

国际信息工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

# 无线传感器及元器件：网络、设计与应用

**Wireless Sensors and Instruments Networks, Design, and Applications**


（美） Halit Eren 著

纪晓东　赵北雁　彭木根 译








机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

# 无线传感器及元器件：网络、设计与应用

（美） Halit Eren 著
纪晓东 赵北雁 彭木根 译

机 械 工 业 出 版 社

本书介绍了无线传感器、元器件以及网络研究领域中的研究成果和应用技术，描述了所有能有效计划、设计与实施无线元器件与传感器网络所必需的内容。从基本概念到实践应用共划分成5章，前3章概括了元器件、测量、传感器技术、通信系统与网络的基础；后2章通过实例的方式主要说明了构造传感器与元器件的具体操作以及传感器网络在各种领域中的应用。

本书反映了当前无线传感器与元器件技术的发展水平，可作为传感技术和传感网络等专业的研究生教材，也可供从事测量与元器件应用领域的专业技术人员、科研人员及大专院校相关专业的学生阅读参考。

Halit Eren: Wireless Sensors and Instruments: Networks, Design, and Applications.



本书版权登记号：图字 01-2007-2955 号

## 图书在版编目(CIP)数据

无线传感器及元器件：网络、设计与应用/(美)厄恩(Eren, H.)著；纪晓东等译. —北京：机械工业出版社，2008.1
(国际信息工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-23058-8

Ⅰ.无… Ⅱ.①厄…②纪… Ⅲ.①无线电通信-传感器-电子元件②无线电通信-传感器-电子器件 Ⅳ.TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 193594 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑：张俊红 责任编辑：刘星宁 责任校对：李秋荣
封面设计：马精明 责任印制：李 妍
北京蓝海印刷有限公司印刷
2008年1月第1版第1次印刷
169mm×239mm ·7.75印张·298千字
0001—4000册
标准书号：ISBN 978-7-111-23058-8
定价：29.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：(010) 68326294
购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话：(010) 88379768
封面无防伪标均为盗版

# 译 者 序

目前，国际上新型传感器正从模拟式向数字式、从集成化向智能化的方向发展。无线传感器及元器件网络因其巨大的应用前景越来越受到学术界和工业界的广泛关注。传感器的应用极其广泛，而且种类繁多，涉及的学科也很多，将无线功能应用到元器件及传感器系统中，使得它们具有无比的灵活性、健壮性与智能性。

元器件应用需要具有广泛知识，例如测量科学，电子电路的设计与制造，集成电路技术，无线通信系统理论与实践，组网技术，通信协议与标准等。无线传感器网络的通信协议，包括网络拓扑控制、路由协议、介质访问协议和短距离低功耗无线通信标准。Halit Eren 博士已经研究无线及便携式元器件 17 年之久，具有丰富的理论基础与实践经验。他的著作《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》对需具备的一些基本原理和必要概念进行了详细阐述，为从事元器件及元器件应用的工程师及科研人员提供了技术性指导。本书也可作为未来可能从事现代元器件及网络的设计与运用的本科生及研究生的教科书。

本书重点叙述了无线传感器及元器件网络的基本知识，共包括 5 章。第 1 章简要讲述了测量、元器件、元器件应用、传感器技术、通信系统以及网络方面的背景知识；第 2 章主要集中讲述现代通信系统，对数字通信技术的基础进行了详细讨论；第 3 章对与无线通信网络相关的网络拓扑结构的类型、协议以及标准进行了讲解；第 4 章介绍了无线传感器及元器件的构造，并给出了具体实例；第 5 章介绍了无线传感器及元器件的应用领域以及网络的实例，具体包括商业应用、研究开发、工业应用、人类健康、环境应用、无线频率识别、用户产品及其他应用等。每一章都为从事测量与控制的专业人员、学生及技术工人提供了基础性知识。文中提供了许多公式和图片来帮助工程师与科研人员理解，以便读者能够根据书中内容解决非本专业领域中的各种技术问题。

需要说明的是，本书是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译的，书中的观点并不代表译者本人及其所在单位的意见，这点请广大读者注意。另外，本书的翻译还受到国家高技术研究发展计划（863 计划）“异构无线接入网协同机理研究”（编号 2006AA01Z257）资助，在此特别感谢。

参与本书翻译工作的还有程昱、何鹏、靳頔、洪伟、杨常青、陈宜杰、纪江峰、王月新、张倩倩、刘铁军、王番、娄贞欢、郭欣、孔佳等。由于译者水平有限，译稿中难免存在错误之处，恳请读者批评指正。

译　者

# 前　言

元器件及元器件应用技术的发展演进过程被划分成了两大分支：其中一个分支代表独立元器件，来履行需要专门测量的任务；另一个分支所代表的元器件能够被组网，从而与其他元器件协同工作来测量复杂系统的变量。这两个分支都不是新的，新颖点在于元器件在不需要物理硬接线连接时仍然能够组网。无线连接与网络技术给我们提供了许多研究、开发及应用的可能性，这些是我们过去都不敢想的。现在元器件能够通过新颖的技术进行组网，同时它们继续在各自的环境中执行它们的任务。

大多数人对无线通信设备都非常熟悉，无线通信设备主要有移动与无线电话、寻呼机、车库开门机、远程控制器、家庭娱乐设备控制器等。无线通信系统在用户产品及工业应用中的发展非常迅速，这对于许多政府及工业部门积极参与技术发展以维持竞争力来说是至关重要的。本书对于突出无线通信系统在元器件应用及测量方面的扩展是非常有益的。

元器件应用需要具有涉及大量原理的广泛知识，例如测量科学、电子电路的设计与制造、集成电路技术的理解、无线通信系统理论与实践的评估、网络、协议与标准。本书的目的主要是为了提供足够的知识，使得读者能够理解无线元器件应用与网络的基本原理。特别强调了无线通信系统这一部分，因为它是科学与技术发展中非常重要的部分。无线通信的发展非常迅速，对我们日常生活的各个方面都产生了影响。无线通信也是研发中最有前途的领域之一。

无线通信技术已经广受欢迎，已有成百上千个无线通信设备制造商和同样数量的无线标准。理解每种设备和相应标准的优缺点能使选择与实施更加容易。本书对无线技术的发展及其相关技术进行了专门介绍。无线技术的引入能够为测量应用提供许多好处，例如降低有线通信成本、简化数据传输、扩展通信距离、发展远程监控，以及提供灵活的设备组网等。

《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》一书的目的是为从事测量与元器件应用领域的工程师、研发人员、设计师、研究员及学生提供知识及指导。本书涉及到的知识有元器件及其应用、电磁波传播、无线工程、数字网络、无线传感器与元器件的设计与应用。每一章为从事测量与控制的专业人员、学生及技术工人提供了基础性知识。文中提供了许多公式，用来帮助工程师与科研人员理解，以便读者能够根据书中内容解决非本专业领域中的各种技术问题。

# 致　谢

许多人都直接或间接地为本书作出了贡献，我要感谢他们，还要感谢我的同事和曾在工作生活中指导过我的良师益友。我尤其要感谢的是香港理工大学的 Kit Po Wong 教授，当我应邀到学校拜访他时，他鼓励我写好本书。撰写本书是一件孤独的事情，需要承担很大的压力，同时也需要有很大的耐心与决心。在我非常迷茫时，Kit Po Wong 教授的鼓励对我非常有价值。我还要感谢在 Gazi 大学电子与计算机工程系一起工作的同事 Ankara，在我写作前期及后期为我提供了办公与计算机设备。

我要感谢一些公司，他们不仅向我提供了他们产品的信息，还允许我重印他们设备的图片。我要特别感谢的公司有 Steven Arms of Microstrain Inc.；Wayne Magnes of Oak Ridge National Laboratory；Graham Moss of Elprotech；Randy Culpepper of Texas Instruments；Colleen Cronin of Analog Devices，Inc.；Colin Pickard of Oregon Scientific；Shana Jacob of CrossBow Inc.

向 CRC 出版社为本书做出贡献的员工们表示由衷的感谢，尤其是 Nora Konopka，他从始至终都在指导着本书的撰写；也要感谢编辑项目开发经理 Helena Redshaw；还要感谢项目编辑 Jay Margolis，正是他们的耐心及专业才促使本书能顺利完成。

# 作者简介

Halit Eren 博士毕业于英国谢菲尔德大学，1973 年获得电子工程专业的工程学士学位；1975 年获得电子工程专业的硕士学位，并获得控制工程专业的博士学位；1998 年获得位于西澳大利亚州的科廷理工大学的工商管理硕士，主修课程为国际管理与领导。

Halit Eren 博士自 1983 年以来一直在科廷理工大学授课，一开始是在位于 Kalgoorlie 的采矿学院，然后是在位于澳大利亚西部 Perth 的电子与计算机工程学院。他曾有一段时间是电子与通信系的领导。

Eren 博士擅长的领域有：元器件、元器件应用系统及网络；电子便携式元器件、信号处理；工程数学。他已经研究无线及便携式元器件达 17 年之久，主要研究领域是电磁场、超声波、红外线技术、现场总线网、遥感勘测与电子控制器。他是许多工业及政府组织的咨询顾问。Eren 博士至今已对 150 多次会议，很多杂志与学报，以及各种 CRC 与 John Wiley&Sons 出版的书籍做出过贡献。

Eren 博士是 CRC 出版社在 2004 年出版的书名为《电子便携式元器件：设计及应用》的作者。现代技术的应用正在生产大量的便携式及无线元器件，本书为他的第二本著作，书名为《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》，与第一本著作相结合使用会受益更多。

# 目　　录

# 绪　论

在工业实施、用户产品、环境监控、研究开发、运输、军事、太空探险、电子设备等方面，必须使用元器件来测量系统的物理变量。元器件集构成了一个元器件应用系统，这个系统负责复杂过程中的无数次测量。元器件通过组建一个网络来直接进行通信，或通过中间设备如计算机、微处理器或控制器来间接进行通信。如今，传统的元器件应用系统还主要通过有线媒质进行相互通信。然而，元器件间的无线通信技术正在迅速发展并被广泛接受，在不远的将来，无线元器件将替代它们所对应的有线部分。

近几年，由于集成电路技术、模拟数字部件、高效低功率微处理器、智能传感器、无线射频通信技术和支持网络的协议标准的使用，元器件及其应用系统已经取得了巨大的进步。尤其是有成本优势的射频产品的发展非常迅速，已经超乎人们的预料程度。一些设备诸如蜂窝通信系统和无绳电话，私有和公共电话系统，无线调制器，无线频率识别器，以及无线传感器和元器件，已经迅速渗透到了人们生活的方方面面。起初这些设备大多数被认为是罕见且昂贵的奢侈品，但现在非常普及，被个人、工业应用、科学研究及其他行业和组织普遍使用。随着需求的增长，小的和大的半导体生产与系统供应商通过引入各种各样的射频产品来参与竞争，从而取得更大的市场份额。

目前，人们对日常生活中的许多无线控制和通信系统耳濡目染，如移动蜂窝电话、无绳电话、手持无线电话机、寻呼机、车库开门机、远程控制器、家庭娱乐设备控制器等。由于无线通信系统在用户产品及工业应用上的增长速度非常迅速，故对政府及工业界来说，如果要想在瞬息万变的无线通信系统及应用领域保持竞争力，则必须紧跟技术发展趋势、保持技术水平同步。

当今的无线通信网络主要是为支撑语音业务的移动电话和相关业务所开发的。然而，随着对无线数据传输和无线接入因特网需求变得强烈，这种现状正在迅速改变。例如，第三代移动通信系统使得用户能随时随地获得个人通信服务，它提供因特网接入、视频业务等。类似地，对于测量和元器件应用来说，引入无线技术后，能在许多行业配置无线元器件网络，例如从智能大楼到用于提高人类健康的可移植无线传感器等，都是无线元器件网络的具体应用实例。

无线元器件应用需要包含各种各样的基本原理和广泛的技术知识，这些原理包括测量科学，设计和电子电路结构，集成电路技术，无线通信系统理论与实践的评估，网络，以及协议和标准等。本书将对这些概念进行深入讲解，使

得读者能够理解无线元器件与网络中的基本原理。尤其要强调的是无线通信系统，正是它的飞速发展，才促进了科学与技术的发展。无线通信系统也是一个有前途的研究领域，有成千上万个研究者都在关注该课题。

国际标准正迅速地出现在应用于传感器及元器件中的无线技术上。一些重要的标准是蓝牙（Bluetooth）技术、高性能无线局域网（HIPERLAN）、用于通信与网络的 IEEE802 标准，以及用于传感器的 IEEE1451 标准。这些标准正在被广泛地接受，设备之间采用点到点或点到多点的通信方式。采样这样的通信方式使得网络配置具有很大的灵活性，并且通信算法也能进行修改，从而提高系统的可靠性和适应性。

本书是对无线传感器、元器件以及网络方面最新技术的阐述。没有接受过电子工程技术学习的工程师和科研人员能从本书受益，本书并没有不必要的难以理解的繁琐知识内容和理论性强的内容。

本书是为那些非常熟悉技术概念的学生、科研人员和工程师编写的，涉及的技术概念有电子学、概率论、通信理论、基本电磁场理论、网络以及网络的操作。需要注意的是，与本书所阐述的内容相关的技术原理在本书中不可能都涉及，因而不可能让所有的读者都能从本书中获得必要的基本知识。本书介绍了一些基本原理和必要概念，使具有不同知识背景的读者能容易理解。这种内容的介绍对于那些从事元器件及元器件应用的工程师及科研人员来说是非常重要的。本书也被推荐作为未来可能从事现代元器件及网络的设计与运用的本科生及研究生的教科书。

本书包括 5 章。前 3 章讲述的内容主要有测量学、元器件、传感器、通信系统和网络。这 3 章所提供的内容与第 4 章和第 5 章的内容形成一个整体。

第 1 章简要讲述了测量、元器件、元器件应用、传感器技术、通信系统和网络方面的背景知识。基于元器件的无线通信发展非常迅速，正逐渐成为工业及许多其他行业上的一种通用应用。无线通信技术能够满足所有类型的元器件及实际系统中的有效通信需求。本章突出强调了数字元器件及其相关的理论、方法和组件。由于数字传感器技术是现代所有类型元器件的支柱，因此本章对这个主题进行了广泛的讨论和介绍。本章也专门研究了无线元器件的通信及其在工业环境中的应用，研究表明噪声、干扰和失真对元器件及相关网络的运维会产生重要影响。

第 2 章主要集中讲述现代通信系统。本章首先讲述的是电磁波传播原理，接着扩展到电磁波辐射的重要特征，如损耗、衰落、反射、折射和衰减。同时，对一个成功的射频通信系统所必需的电子元器件进行了讨论。由于数字通信技术的应用使得无线传感器、元器件使用与组网成为了可能，因而对数字通信技术的基础进行了详细的讨论。对现代通信方法、调制、复用技术、频率扩展和

多址接入方法也进行了讨论并给出了具体实例。

第3章讨论了网络、协议、标准及拓扑结构。网络是相互作用设备的集合，这些设备通过通信媒质被连接在一起，并需要合适的软件支持。将多种设备连接在一起，并实施软硬件资源的网络化是非常重要的，通过相互间信息交流，建立协同运行机制，并共享设备功能，从而提高整个网络的性能。在本章中，对与无线通信网络相关的网络拓扑结构的类型、协议及标准进行了讲解。本章对无线通信网络的安全机制进行了特别描述，并对其方法进行了讨论。有线通信网络中使用的一些技术和知识，能直接应用到无线通信网络中。本章对最新出现的无线技术，如IEEE802系列标准和蓝牙技术也进行了讨论。

第4章介绍了无线传感器及元器件的构造，并给出了具体实例。元器件通信协议正在重新制定，本章对应用在无线元器件及传感器方面的现代技术进行了讲解。可以使用嵌入式或组合设计来生产现代无线传感器和元器件网络。这些网络能够通过使用网桥、路由器和中继器进行覆盖范围的扩展。本章讨论了无线传感器和元器件的构造，并提供了许多实例；也讲解了无线通信网络的功率问题。同时，对无线传感器网络和无线集成传感器网络也进行了详细阐述。另外，对蓝牙技术和IEEE802标准的应用进行了说明。

第5章着重阐述了无线传感器及元器件的应用，涉及范围从复杂的工业车间应用到在荒郊野外跟踪野生动植物。无线传感器及元器件的供应商们通过提供各种各样的无线通信设备来满足用户需求，这样将会催生新的应用。本章介绍了无线传感器及元器件的应用领域以及网络实例，具体包括特殊应用、商业应用、研究开发、工业应用、人类健康、环境应用、无线频率识别、用户产品和其他应用等。本书反映了当前无线传感器与元器件技术的发展水平，并且给在校学生、研究人员、实践工程师和科研人员提供了指导。希望你能够喜欢本书，能从中获得有价值的知识，并能将书中讲解的知识应用到你所感兴趣的领域中。

# 第1章　元器件及其应用

元器件的研发是为了感知和测量一些物理变量，这些物理变量是工业生产、环境应用、研发、运输、军事设备以及我们日常生活的基本组成部分。元器件应用系统是一些互连的元器件的集合，它们或者通过一些中间媒介设备，比如计算机或微处理器，或者直接进行信息互通。大部分的元器件通信系统是基于有线媒介的，但是当今无线通信发展迅速，其在工业和其他领域得到了日益广泛的应用。本章主要介绍一些与测量、元器件、元器件应用、传感技术、通信系统和网络等相关的、简单但必要的背景知识。

如果物理变量的行为方式是已知的，那么它的性能就能被监测和评估。元器件的应用范围很广，例如从实验室的理想条件到恶劣的复杂环境，比如在原子反应堆中，到远程定位，比如卫星系统或者太空船。制造商为了满足不同的需求，生产了一系列的元器件。大部分现代化的元器件在使用范围、显示类型，以及与其他设备通信方面具有极大的适应性。

在元器件通信方面，信息源产生的信息被传送到接收器。源将测量或感知到的变量转换成电信号。然后电信号被处理转化成能够以有用的信息或消息的形式通过通信信道传输的信号。接收到的信号在接收端又被转化成原始信号。通过一系列的技术，信息能够通过无线或者有线的媒介传输。

近几年，由于集成电路技术的高速发展，低成本的模拟和数字元件的普及，以及高效率的微处理器的出现，测量、元器件以及元器件系统产生了巨大的进步。因此，由于在线和离线分析的应用，先进的信号处理技术的使用，以及国内和国际标准的制订，测量和监控元器件的性能得到了很大的提高。如今，无线通信技术有能力满足所有元器件及其应用的通信要求。

本章简要介绍了测量问题，并且解释了什么是元器件架构。对于数字元器件及其相关理论、方法和组成，将着重给予介绍。由于传感器技术是所有元器件的基础，所以本章将详细讲解传感器的基础知识。另外，本章还将对元器件通信进行概述，涉及到普通元器件和工业应用元器件。对元器件系统以及相关的标准、协议也将有所讨论。从总体上来看，本章内容主要集中在信息源及其相关的问题上，比如噪声、失真和通信中的干扰等。

## 1.1 测量

测量是在符合国家和国际标准规范所定义流程的前提下，收集物理信息的过程。它是通过具有特殊功能的人造元器件来实现的。元器件功能的呈现是通过被测对象的物理变化和测量得到的数值等表现出来的。

一个典型的元器件由许多元件组成，传感器和变换器是主要的元件，用来对物理变化做出反映并产生有用信号。传感器是一种可以把物理信号变化转换成可处理电信号的物理实体。传感器信号大部分是以电信号形式存在，或者最终转换成电信号，原因在于电信号容易处理、显示、存储、传输。与传感器相似，变换器的功能是在两个物理系统之间把信号从一种能量形式转换成另一种能量形式。

变换器应用领域非常广泛，包括航空航天、自动化、生物医学、工业控制、制造和处理控制。随着对自动化系统需求的增大，变换器的需求也随之增大。智能传感器和变换器的发展以及与无线技术的集成在相当程度上满足了这一需求，使得现在的元器件以及应用系统更加灵活、便宜、容易使用。

物理信息一旦被转换成电信号，传感器信号和物理信息之间的转换关系就可以用一个转换函数来表达，用来表征传感器信号和物理信息之间的数学模型。在连续系统中，传输函数可能是线性或者非线性的。比如，线性关系可以用下式表示：

$$y = a + bx \tag{1-1}$$

式中，$y$ 为来自传感器的电信号；$x$ 为物理激励信息；$a$ 为 $y$ 轴的截距，它是零输入时产生的输出；$b$ 为斜率，也就是灵敏度。

输出信号 $y$ 表示物理信息变化的幅度、频率、相位、电信号或者其他属性。这取决于所用传感器的设计和构造以及物理变量的特性。非线性转换函数可以是对数、指数或其他形式的数学函数。在许多应用中，非线性传感器可以通过一些限定条件使之线性化。

对于某一特定的测量，可能要用到多种类型的传感器和变换器。对于传感器、变换器、测量元件和信号处理技术的正确选择至关重要。

## 1.2 元器件架构和元器件应用

元器件是人们用现有的关于物理过程的知识以及可以利用的技术人为制造的设备。人们设计了恰当的硬件和软件来保证其能够满足规范和标准的要求。

一个典型元器件的功能可以被分成更小的部分，如图 1-1 所示。所有测量元

器件都包含了部分或全部的单元组成，只是在处理、传输、显示信息方面有所不同。

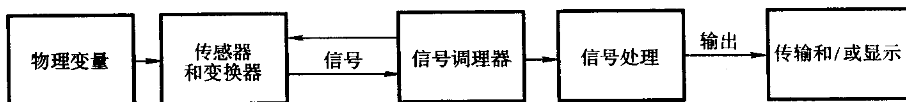



图 1-1 元器件的必要组成部分

一般来说，传感器产生的信号在原始状态下不适合显示、记录、传输。传感器信号的幅度、功率或者带宽可能非常小，或者带有非常严重的噪声和干扰，以至于掩盖了有用信号。信号调理器把传感器信号调理到可以接收的水平和形状，从而使其可以被后续处理和显示。

### 1.2.1 信号和信号调理

对物理信号的测量可以产生电信号。一个信号可以被定义成一个随时间、空间或其他维度独立变化的物理量。因为不同的信号需要采用不同的处理技术，所以必须使用不同类型的模拟和数字处理方法，而且也要选择相对应的元器件。

信号分析和处理需要信号的数学描述。一个信号可以用一个或多个独立的变量函数来描述，因此传感器信号可以用许多数学方法分类，比如多波段多维信号，连续或离散信号，确定或随机信号（平稳信号或非平稳信号），瞬时信号等。

在一些有许多信号源同时存在的应用场景中，需要使用多个传感器来产生信号。这些信号可以用矢量表示。一般来说，如果一个信号是含有一个独立变量的函数，则称为一维信号。如果一个信号的值可以表征为 $m$ 个独立变量的函数，那么就是 $m$ 维信号（比如由多个测震仪采集的地震信号）。通过采用矩阵中的矢量可以表示这些信号，同时也有一些适当的技术可以用来处理这些信号。

一个可以用明确的数学表达式或者特定规则来表示的信号称为确定信号。也就是说，信号过去、现在、将来的值都能精确地确定。从这个角度上来说，可以根据独立变量的特性及其取值来对信号分类。确定信号可以是连续的，也可以是离散的。

连续信号，也就是模拟信号，在（$-\infty \sim +\infty$）的每一个时间点上都有定义。连续信号可以是周期或者非周期的。对于周期信号，信号周期性地重复，它可以用正弦波形来表示：

$$x(t) = X_m \sin(\omega t) \tag{1-2}$$

式中，$x(t)$ 为时间信号；$\omega$ 为角频率；$X_m$ 为最大幅度。

连续信号可以是周期的，但不一定是正弦的，可以是三角波、锯齿波、矩形波或者其他规则的或者不规则的波形。如果信号是周期的非正弦波，那么它

可以表示成傅里叶级数的形式：

$$x(t) = X_0 + X_1\sin(\omega_1 t + \phi_1) + X_2\sin(\omega_2 t + \phi_2) + \cdots + X_n\sin(\omega_n t + \phi_n) \tag{1-3}$$

式中，$\omega_1$，$\omega_2$，…，$\omega_n$ 为角频率（rad/s）；$X_0$，$X_1$，…，$X_n$ 为对应频率的最大幅度；$\phi_1$，$\phi_2$，…，$\phi_n$ 为相位。

在式（1-3）中，项数可能是无穷的，项数越多，则波形越精确。这些元素组成了信号的整个频谱。信号可以用时域也可以用频域表示，这两种表示方法在分析时都十分有用。

离散信号只在离散的时间间隔上进行定义。这些时间间隔不一定要相等，但为了计算方便，都被认为是等间隔的。式（1-2）可以用离散形式表示为

$$x(nT) = X_m\sin(\omega nT) \tag{1-4}$$

式中，式（1-2）中的 $t = nT$，$n = 0$，$\pm 1$，$\pm 2$，$\pm 3$，…。

数字信号可以表示成 1 和 0。这些信号可以利用数字信号直接产生，或者将模拟信号通过 A/D 转换器转换获得。和模拟信号相比，数字信号有许多好处：由于只是 0 和 1，因此它容易产生、存储、处理、复用和传输；而且它的抗噪声能力和纠错能力较强，容易采取加密和其他安全措施。然而，它在通信过程中需要很大的带宽，尤其是在无线通信中。

随机信号是随时间随机产生的。自然界中有很多的随机信号，它们组成不规则的循环，不会完全重复。随机信号不可能被精确地描述，或者某种描述可能对于实际的应用显得过于复杂。然而，统计学方法和概率理论可以通过分析具有代表性的抽样来分析随机信号。从理论上讲，要完整地描述一个随机信号需要无穷长的时间周期，所以分析时通常要利用一些数学工具，比如概率分布、概率密度、频谱分析、互相关、自相关、离散傅里叶变换、快速傅里叶变换以及自动谱分析、方均根值、数字滤波器分析等。

如果信号的统计特性不随时间变化，那么它就称为平稳随机信号。然而在许多情况下，信号的统计特性随时间变化，产生的是非平稳随机信号。在这种情况下，可以采用时间平均等其他一些统计方法来进行信号分析。

信号可以根据它们的幅度值、信号源端和地面的关系、带宽以及它们的输出阻抗特性等进行分类。如果按幅度分类，低于 100mV 的信号被认为是低幅度信号，需要进行信号功率放大。

如果信号源的两个终端之一保持恒定的电压，那么产生的信号称为单端信号。通常一个终端是接地的，作为其他信号的一个公共点。与此相反，差动信号源的两个输出端的电压同时变化，变化量一致但方向相反。任何一个来自相同源的差动信号必有两个不同的端。电桥的输出电压就是一个典型的实例。

窄带信号相对于中心频率来说具有非常小的频率范围。一个窄带信号可以

是直流或几乎直流，作为低频信号源的输出（如热电偶）；也可以是交流，比如从交流驱动的调制传感器获得的信号。

宽带信号相对于中心频率来说具有非常大的频率范围。中心频率的值是非常重要的，比如，频谱在 1～10Hz 的信号可能被认为是宽带信号，而中心频率是 2MHz 的两个 20kHz 的边带信号被认为是一个窄带信号。

### 1.2.2 元器件的种类

元器件大致可分为模拟元器件和数字元器件或这两者的结合。由于数字元器件设计灵活、可编程、容易使用、易于和其他设备通信，因此得到了广泛应用。但从生产者和设计者的角度来看，许多元器件的前端仍是模拟的，因为大多数传感器和变换器产生的是模拟信号。模拟信号再转换成数字信号，由数字元器件进行处理。

元器件可以分为便携的和固定的。便携元器件要依赖机载的电源，并能在不同的地方使用；这种移动性具有很多优点。固定元器件具有无限制的电源，广泛应用于实验室和工业界。固定元器件是系统的一部分，比如汽车和飞机的元器件板，工业、建筑、发电厂的机器等。尽管已经分为便携的和固定的，但它们都工作在模拟或数字状态下。

模拟元器件的运行完全遵守模拟信号处理原则，因此它们采用模拟信号的形式进行测量、传输、显示和储存。模拟元器件主要利用电流和/或电压的幅度、相位、频率或它们混合的连续变化进行操作。由物理信号转化成的待处理信号可以是确定性的，也可以是非确定性的，但有可能包含大量的噪声。模拟元器件中的信号调理器经常是由许多功能模块集成的，比如电桥、放大器、滤波器、振荡器、调制器、偏置电路、电平转换器和缓存。其中部分功能模块如图 1-2 所示。

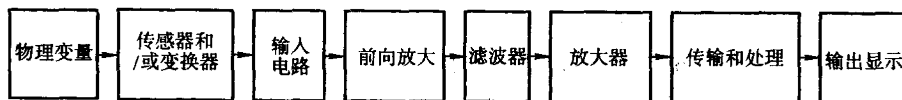



图 1-2 模拟元器件的详细框图

模拟元器件的一个重要组成部分是运算放大器（缩写为 op amps）和元器件放大器。运算放大器是由单片集成电路或者混合元件集合而成。一个运算放大器可以在一个芯片内集成成百上千个晶体管、电阻和电容。它们可以配置成正向或反向放大器。它们通过合适的外部元件可以组成乘法器、加法器、限幅器、滤波器等。

数字元器件的运行完全遵守数字信号处理原则。在许多情况下，传感器和变换器产生的信号在转换成数字信号前首先被模拟电路处理。然而，由于制作

现代化传感器及相关设备的微技术和纳米技术发展迅速，许多纯数字元器件已经研发出来。比如，现在的基于数字电子学的智能传感器在一片芯片上可以包含完整的信号处理电路和传感器本身。因此，许多智能传感器的输出可以和其他的数字设备直接相连。

微元器件，也称为微传感器，是一种典型的现代化的数字元器件，如图 1-3 所示。这个微传感器系统的单片实现是基于 CMOS 工艺的。片上集成了一个电压、电流和电容传感器接口，一个温度传感器，一个 10 通道 12bit A/D 转换器，一个 8bit 微控制器，16bit 硬件乘法器和 40bit 加法器。工作电压为 3V，全功率时电流为 16mA，空闲状态电流为 850μA。

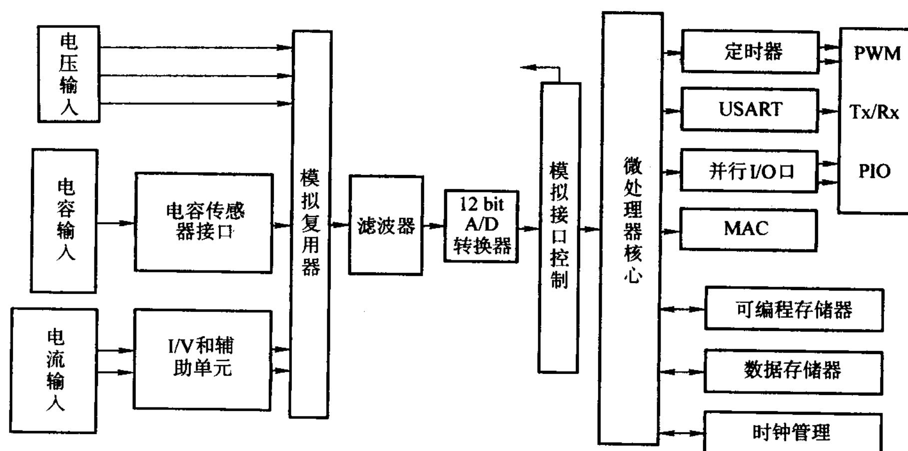



图 1-3　一个典型的微传感器的框图

数字通信（见图 1-3 所示系统）通过片上串口和并口实现。此系统包括两个并行输入/输出（PIO）单元和一个通用同步/异步接收器/发送器（USART）。可编程存储器由 512B 只读存储器（ROM）、通用的 4KB 随机存储器（RAM）以及用作数据存储的 512B RAM 组成（译者注：B 表示字节）。多重加法器（MAC）支持 6bit 加法器和 40bit 加法器，允许片上信号处理。标准定时由看门狗定时器和多功能计时器提供。

图 1-3 所示的微传感器支持 C 语言。硬件支持单断点和编码调试事件跟踪功能。一个先进的系统接口可以支持处理中断建议、单步运行、读写系统寄存器。单循环中断响应和直接内存访问（DMA）可以使之应用于对时间有严格要求的应用场景。时钟管理用来分开系统时钟，以便减小功率，分配一个慢速时钟，或者终止时钟直到一个指定的事件发生。

这种类型的微传感器的优点源于数字电路与模拟电路相比之下具有的便宜、可靠，以及灵活特性。因为数字硬件允许编程操作，可以通过软件来修改元器

件的功能，所以数字硬件及其相关软件在系统设计方面较同等的模拟设备提供了更多的灵活性。但值得一提的是，数字元器件的一个缺点是一些超宽带信号需要严格的实时性处理，需要考虑大量的内存和非常复杂的软件实现。对于这样的信号，模拟信号处理也许是惟一的解决办法。

现代化的无线元器件几乎全是数字的，因此在下面的章节中将详细介绍数字元器件。

## 1.3 数字元器件的硬件和软件

由于从物理变量获得的信号通常是模拟形式的，所以传统的数字元器件包括两种类型的处理技术，即模拟信号处理技术和数字信号处理技术。在模拟部分，信号在模拟器件中被处理，在传送到下一个处理阶段前转换成相应的数字信号。在转换处理阶段，会采用多路复用器、采样保持（S/H）设备和 A/D 转换器等。近些年，业界已经以复杂微元器件的形式制造出数字元器件，如图 1-3 所示。微元器件在一个芯片上集成了一个元器件必需的所有组成单元。图 1-4 为传统数字元器件的典型组成元件框图。

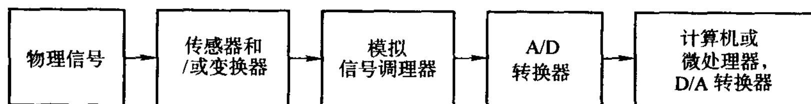



图 1-4 典型的数字元器件的元件

一个典型的数字元器件由 5 个主要的子系统组成：信号产生和调理的模拟前端，通用可编程数字硬件，存储和通信元件，特殊应用输入/输出元件和其他辅助元件，比如显示器和电源等。在一些简单类型的元器件中，所有这些元件不可能都存在，这主要取决于它们在系统中所起的作用以及系统需要的功能。然而，在所有数字或半数字元器件中，传感器信号都需要被模拟信号调理电路放大或者衰减、滤波，被 A/D 转换器转换成数字信号。然后根据一定的测量算法处理数字信号，显示、存储结果，或者将其传输到其他设备，以便后续处理或存储。一些传感器产生的信号强度足够强，可以直接连接到数字系统，比如用来运动和旋转监测的各种光通信系统。

一旦信号被转换成数字信号，数据信息就可以通过采用各种数字信号处理技术进行处理，比如进行 FFT 分析，数字滤波，连续或者逻辑判决，相关，频谱分析等。

现代化的数字元器件在复杂的运算、存储和传输信息以及交流相关数据等方面有非常重要的应用。原因在于这些元器件是基于数字处理器的，可以提供强大而且灵活的信号处理和数据处理能力。信号处理和数据处理可以通过软件

或者硬件来实现。数字元器件另一个重要的优点就是一旦信号被转换成数字信号，它们可以被管理、共享，可以被其他的数字设备处理，比如计算机和基于微处理器的系统。这为数据处理、通信、存储和可视化显示提供了可能。

图 1-5 是一个典型的基于微处理器的数字元器件的框图。目前正在使用的许多基于微处理器的数字元器件能够实现许多功能，例如进行复杂的测量，可以存储大量的测量结果，图形化显示信息，可以作为一个复杂测量系统的一部分。大多数元器件都可以作为独立元器件来单独工作，或者与先进的通信技术结合在一起构成复杂系统的一部分。

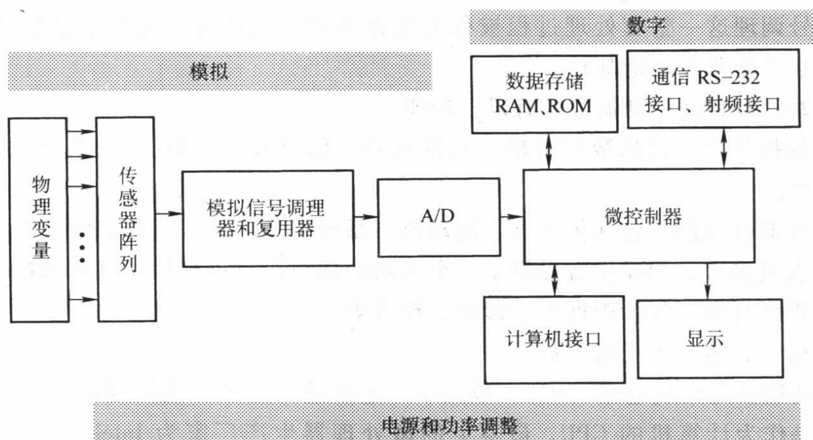



图 1-5　典型的基于微处理器的便携元器件

许多现代化的数字元器件在有线和无线方面都具有高效的通信处理能力。在这些元器件当中，集成的快速中央处理单元、大容量的内存和先进的无线通信设备，使它们更加灵活、易于使用、功能多样，而且可以通过计算机网络互联。

### 1.3.1　数字元器件的组成单元

数字元器件的关键组成单元是 S/H 设备和 A/D 转换器。这些组成单元可能限制元器件的准确性和带宽。其他的关键组成单元包括微处理器、微控制器、内存、I/O 设备、信号转换器和数字信号处理器。

设计者可以从一系列具有不同性能、功率损耗和大小的信号处理器、内存、外围设备以及其他设备中为数字元器件选择组成单元。同样地，模拟组成单元制造技术的发展使得处理带宽、敏感度和准确度有了进一步的提高。快速而且敏感的 A/D 和 D/A 转换器价格都很便宜。新颖的转换器架构把内部的数字反混叠滤波器和 Σ-Δ 转换器集合在一起，使设计者可以把前端模拟硬件尺寸缩小到最小。友好的用户操作系统和高效率的软件开发工具的发展也促进了数字元器

件的发展。

1.3.4 节将讨论采样保持设备和 A/D 转换器。微处理器、微控制器、内存、I/O 设备和数字信号处理器将在下面的章节中介绍。

## 1.3.2 微处理器和微控制器

微处理器和微控制器是所有数字元器件的“心脏”。它们在数据获取、数据处理和控制以及元器件通信方面具有重要的作用。然而，所有数字元器件的操作都是由通用数学理论决定的，比如采样定理和数字信号调理定理。采样、转换和信号调理这一整套处理过程被称为数据获取。这部分主要介绍数据获取系统的基本功能及其理论基础。

微处理器和微控制器主要有以下功能：

- 数据处理，包括数据获取、数据处理、信息提取、数据压缩、解释、记录和存储。
- 元器件控制，包括传感器、制动器、系统资源、外部及内部资源的控制。
- 人机接口，为操作者提供了一个灵活的用户接口进行信息显示和控制。
- 程序开发，包括查询表、诊断、校准等。
- 通信，包括无线通信技术。

微处理器是集成电路（IC），数据以二进制进行处理。微处理器的一个常规目的就是作为计算机的 CPU。最常见的微处理器生产厂家为 Intel、摩托罗拉、AMD、Philips、Zilog、Atmel 和日立等。元器件中最常用的微处理器可以分为嵌入式控制器、数字信号处理器和专用计算机三类。

微控制器是特殊的微处理器。它在同一片集成芯片上具有内置的内存和接口电路。因为它体积小、简单、成本低、效率高，所以它在元器件及其应用系统中得到了广泛的应用。典型的微控制器家族是摩托罗拉公司的 MC68HC11 和外围接口控制器（PIC）。现在有许多适合元器件及其应用系统的微控制器，而且发展迅速。

微控制器可以认为是带有信息存储功能的单片设备，可以控制读/写功能和处理数据。它的性能主要由其字长大小，也就是 CPU 一次可以处理的比特数决定。

许多微控制器在数据处理方面都含有类似的组成单元。图 1-6 是典型的微控制器的架构图。其主要器件和功能如下：

- CPU：执行特定的指令。
- 内存用来存储信息。不同的存储设备如下：

■ ROM：存储永久信息和应用程序；

■ RAM：存储程序运行期间连续变化的数据；

■ 可擦除内存，比如 EPROM、EEPROM，主要存储应用程序，但它是可擦除和可编程的。

- 接口元件：与外部设备和组成单元通信。

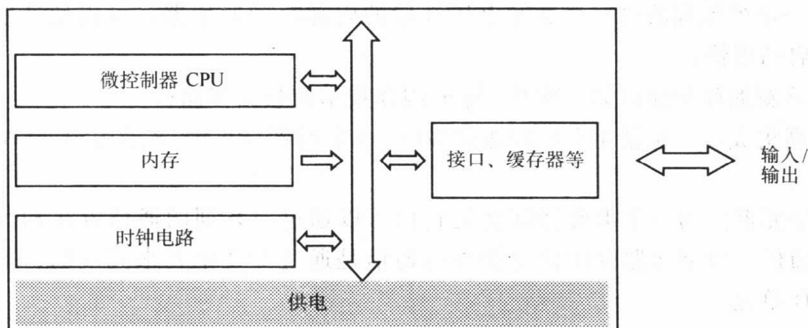



图 1-6　微控制器的框图

日立公司的 H8 和摩托罗拉公司的 HCS08 是两种经常用在元器件和元器件应用系统中的微控制器。第 4 章和第 5 章会提供更详细的实例以作进一步阐述。

**日立公司的 H8/300H**

H8/300H 系列是一组基于 H8/300H 的 16bit CPU 内核的 16bit 设备，具有不同的内存大小和外围特性。这组微控制器具有相同的引脚，所以可在设备间互换。16bit 的微控制器具有 16 个 16bit 的常用寄存器和 62 个基本指令。它有 4 个定时器：

- 定时器 A：分离时钟的输出引脚；
- 定时器 B（8bit）：输出比较波形的输出引脚；
- 定时器 W（16bit）：功能包括输出对比、输入俘获输入和脉冲宽度调制输出；
- 看门狗定时器。

它们应用日立公司的嵌入式工作组件/编译器。H8/300H 的其他特性包括 29 个通用 I/O 引脚、8 个 A/D 转换引脚、EEPROM 接口、$I^2C$ 总线接口、串行通信接口和支持不同的低功率状态。

**摩托罗拉公司的 HCS08**

摩托罗拉公司的 HCS08 是一种典型的用在嵌入式元器件中的低功耗微控制器。HCS08 微控制器是一种低功率 1.8V、8bit、可以在片上调试的设备。可以扩展为 16bit 的微控制器使用。它们主要用做涉及长时间空闲状态，但又要求上电启动快速的远程控制应用中。其他应用包括手持元器件、实用电表、安全系统和其他便携的无线通信设备。下面是 HCS08 的特性：

- 多样的功率管理模式，包括 20nA 的低功率模式；

• 一个从“停止”到0.7μA的零元素自动启动；

• 高达40MHz CPU/20MHz总线工作在2.1V，16MHz CPU/8MHz总线工作在1.8V；

• 一个可编程的带有温度和电压补偿的内部时钟发生器，可以使通信更加可靠，启动更快；

• 重新编程和通过第三代0.25μm闪存技术的数据存储；

• 高集成度，包括4个串行通信端口、8定时器/PWM、8通道10bit A/D转换器。

数字元器件的一个重要特征就是它们可以通过一系列的通信方法和其他设备进行通信。数字元器件的内部和外部通信是通过I/O单元来完成的，下面将讨论I/O单元。

### 1.3.3 输入和输出

微处理器和微控制器之间的数据通信是通过I/O设备来完成的。由于通信发生的地点和所涉及到的设备的类型不同，所以有多种I/O硬件和软件可供使用。下面介绍一些应用在元器件中的I/O设备。

• 通用异步收发器（UART）：一个适合异步串行通信的端口。

• 通用同步/异步收发器（USART）：一个同步/异步串行通信均适合的端口。

• 同步串行端口：不需要开始/停止比特，可以在比异步串行通信更高的时钟速率下工作。它们用来和高速设备通信，比如内存服务器、显示设备、附加A/D端口等。另外，它们适合于简单的微处理器网络。

• 串行外围接口（SPI）：一种同步串行端口。另一个版本是串行通信接口（SCI），是UART的加强形式。

• $I^2C$总线：一种由Philips公司发明的简单的双线串行接口。它主要用于8bit的应用，广泛应用在消费电子产品、自动控制和工业应用等领域中。多达128种设备可以连接到网络上，它们可以扩展到10m的覆盖距离。

• 控制器域网络（CAN）：一种多路复用配线机制，由Bosch和Intel公司共同研发，用在汽车行业的数据配线中。CAN规范广泛应用在北美和欧洲的工业控制中。

近年来，无线通信系统中的技术的飞速发展对数字元器件的发展和使用产生了重大的影响。无线元器件可以把获得的数据传送到特定的基站或者在不同元器件之间进行对等通信，从而形成局域网通信方式。传感器和变换器获得的信号被编码成适合无线传输的信号。在接收端，信号被解调，通过合适的方法把有用信号提取出来。在很多应用场景中，许多不同的信号可以在一条传输链

路上进行复用。传输链路可以通过超高频和其他的无线波、微波、红外线以及激光等实现。

### 1.3.4 信号转换

在大多数元器件中，模拟信号在变换成数字信号之前要先经过信号调整，主要有以下两个目的：

- 放大弱信号，削弱强信号；
- 通过合适的电路把不期望的频率过滤。

放大或削弱作用是使信号的幅度满足 A/D 转换器的要求，这是由于通常传感器产生的电压信号的幅度比 A/D 转换器要求的小，另一方面是因为大多数 A/D 转换器的输入要求是单极的，也就是说 A/D 转换器的一端要连接在一个参考端上。如果传感器产生的信号是差动的，那么放大器必须把它变成单极的或者使用一个带有单端输出的差动放大器。

滤波是用来修改传感器产生信号的频谱。使用滤波器有两个原因：①减少干扰；②使信号带宽变窄。将信号带宽变窄，可以抑制信号的带外噪声并且防止信号混叠的产生。

根据信号的特性，也可以应用其他的信号调整技术，包括加法器、乘法器、限幅器等。一旦模拟信号调整结束，就可以把它变成数字形式。模拟信号数字化首先要对信号进行时域采样，然后再把得到的采样值转化为相应的数字形式。

在转换阶段，A/D 转换器把采样模拟信号量化成能够被转换器识别的有限集里的离散值。这样，模拟信号被转换成了数字信号。一旦生成离散信息，数字信号就是一系列存在内存中的数值，它们和时间的关系由信号处理器保存。

采样和信号变换是数字信号处理的第一个阶段，A/D 转换的一个基本要求是通过转换过程的信号能够代表原始的模拟信号。这意味着模拟信号可以通过数字信号重建，因此采样周期必须满足采样定理的要求。

采样定理表明，单位时间的采样数必须至少是连续信号最高频率的 2 倍。通常，根据高频分量的重要性不同，采样必须是 5 ~ 10 倍的最高频率。这个在信号获取理论中占有重要地位的法则保证了在一定的条件下，一个连续时间信号可以由它的等间隔的瞬时采样值完全代表和恢复。

A/D 转换包含四个部分：多路复用、采样、转换、量化编码。如果转换器中有不止一个信号，那么多路复用就是必需的。在转换过程中，有三个主要设备：多路复用器、S/H 设备、A/D 转换设备。

多路复用由多路复用器实现，多路复用器就好像一系列开关，它从多传感器系统中选择一路特定的信号，以便把它转换成数字信号。图 1-7 是多路复用器的原理图。多路复用可以由两种方式实现：模拟复用或数字复用。多路复用器

把模拟信道连接到S/H电路。S/H电路对信号进行采样和保持，这样A/D转换器就可以无差错地转换。一旦转换开始，转换器的输出就连接到一个通用总线，属于特定信道的数据就可以通过软件来处理。

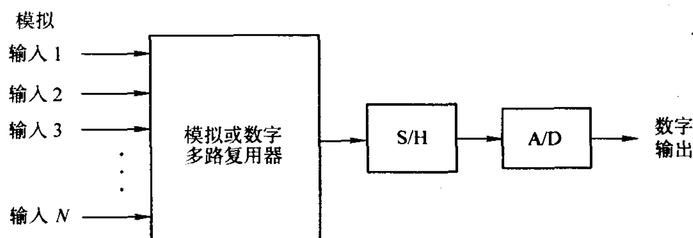



图1-7　多路复用器的功能

不管多路复用类型是哪种，多路复用器是受中央处理器、微控制器或计算机控制的。这就允许体积小、功耗低、成本低的设备使用。然而，多路复用存在一些问题。比如，多路复用在A/D转换器的输入端产生暂态过电压或过电流，因此必须让信号在转换开始前就位。过电压或过电流可以通过各级放大器和滤波器组成的处理链进行传播。另一个问题就是由于开关效应和寄生电容造成的信道间的信号泄露。这些无疑将极大地影响数据的获取速率。最后，如果每个数据获取信道需要不同的设置和参数，比如增益、频率响应等，那么这些参数就必须基于每个信道进行切换，这是非常困难、缓慢而且代价昂贵的。

采样是由S/H设备实现。它们补偿由于转换次数造成A/D转换器中的不足。通常A/D转换器的输入信号随时间而变化，但是如果在转换过程中输入信号发生变化，那么数字输出信号会是不确定的值。S/H设备保证了信号的不确定性在转换时间内维持在一个很低的水平，因此保证了转换的准确性。

图1-8表示了S/H电路的基本结构。它包括一个电容、一个开关及其控制电路、两个用来匹配外界电路阻抗的放大器。控制电路对开关$S_1$交替发出“采样”和“保持”命令。当收到“采样”命令时，开关闭合，电容$C_h$开始充电直到达到输入信号的水平，就进行了一次抽样。控制电路马上产生“保持”命令，$S_1$打开，然后电容$C_h$保持的采样电压得以保持，直到下一个采样开始。

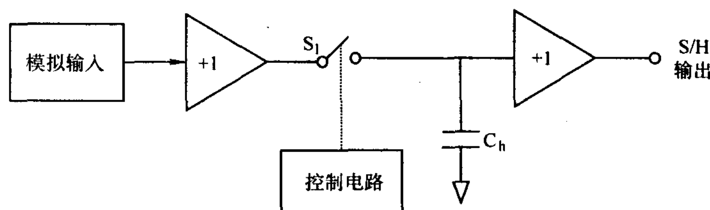



图1-8　S/H电路的基本结构

从数学分析的角度来讲，这意味着

$$\left(\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\right)_{\max} \leqslant \frac{FS}{2^n t_c} \tag{1-5}$$

式中，$n$ 为转换器的比特数；$t_c$ 为转换时间，$FS$ 为满度值。

式（1-5）说明转换不可能完全精确。这就是引入 S/H 电路的原因。S/H 电路将得到的模拟信号采样值在转换完成之前保持不变，这样就消除了电压的漂移。一旦在转换期间给转换器提供一个固定的电压值，那么由于时变造成的输出不确定性就大大的降低了。

在数字元器件中，采样通常是等间隔的。然而，这可能就会加剧带宽和准确性之间的矛盾。如果要求高精确度，那么 A/D 转换器所需的转换时间就会极大地限制最大采样频率和带宽。为了克服这个限制，可以考虑采用不同的非同步随机采样策略。依靠在足够长的时间内通过合适的数字滤波器，可以用伪随机采样来实现元器件的带宽不受 A/D 转换次数的限制。

转换是由 A/D 转换和 D/A 转换组成。A/D 和 D/A 转换为最终的数据计算和处理提供模拟和数字环境的接口，因此它们形成了一条重要的连接实时事件及数字环境的纽带。

所有的现代化 A/D 转换器产生二进制代码的输出数字信号。输出的长度定义了 A/D 转换器的理论分辨率和 A/D 转换器可以提供的数值范围。A/D 转换器可以检测的最小的输入电压变化值为

$$V_{\mathrm{LSB}} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^n} \tag{1-6}$$

式中，$n$ 为转化器产生的比特数；$V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 为 A/D 转换器能正确处理的最大和最小的输入电压。

有许多不同种类的商用的 A/D 转换器。最流行的 A/D 转换器是反匝道型、逐次逼近型（串行）、闪存型（并行）和 Σ-Δ 型。下面简要介绍这四种转换器。更多的关于 A/D 和 D/A 转换器的知识可以参考各种元器件手册。

反匝道型转换器是一种最慢的简单 A/D 转换器，而跟踪转换器是反匝道型的一个改进。

逐次逼近型转换器含有比较器，它的速度比反匝道型要快得多。但转换器需要在速度和复杂度间有个折中，它的缺点在于需要大量的编程逻辑来实现逐次逼近过程中不同阶段的 D/A 解码。

闪存型或并行转换器是运行最快的，但也是最复杂的 A/D 转换器。和逐次逼近型转换器一样，它也是通过比较参考信号和模拟输入信号来工作。但是根据表示精度和字长，它有许多比较器，一个 $n$ 比特的转换器需要 $2^n-1$ 个比较器。并行转换器的转换速率很快，因为比较只需一步即可完成。数字输出可以

实时产生，这主要取决于编码逻辑的传播时间。

闪存型转换器的主要缺点是需要大量的转换器来实现大尺度转换器。要增加一位二进制分辨率，所需比较器的数目要成倍增加。比如，8bit 转换器需要 255 个比较器。如果增加 4bit，即对于 12bit 转换器，则需要 4095 个比较器。

Σ-Δ 型转换器，有时也称为 Δ-Σ 转换器，是一种完全不同于上面所述转换器的方法，它把模拟处理限制到几个必要的步骤，再用数字信号处理技术达到要求的性能。这就导致了在低频范围内（1～10kHz）精确度高（可达 24bit），而在中频范围内（10～5MHz）有较高的分辨率（12～16bit）。

Σ-Δ 型转换器的集成度更高，体积更小。它的另一个特性是可以通过改变外部采样时钟来调整频率。在低采样速率下，Σ-Δ 型转换器可以达到非常高的分辨率。这就允许将传感器和 A/D 转换器直接相连，从而简化了微弱低频信号的获取，比如变形测量器、热电偶等。

量化和编码是 A/D 转换的一个结果，在这个过程中模拟信号采用相应的二进制信号来表示。幅度量化是指一个幅度连续的信号被转换成幅度离散的信号。量化进程通常是非记忆的，也就是说，量化器的下一个输出值和其上一个输出值没有任何关系。

编码是将模拟信号在数字域用一系列的 $n$bit 来表示。对于不同采样，每个量化器的输出状态是不一样的。对于 $n$bit，会产生 $2^n$ 个不同的序列，可以获得 $2^n$ 个输出编码。编码所用比特是二进制码，可以是单极性的，也可以是双极性的。

从信号处理的角度来说，A/D 转换器可以用它产生的噪声来描述。量化就像采样一样，会将一些不确定性引入到量化之前的模拟信号。对于高分辨率的 A/D 转换器，这种效应可以被看作是附加噪声。量化噪声或信噪比主要取决于输入信号的特性和量值。

除了量化噪声，A/D 转换器还有其他类型的噪声，包括内部电压参考噪声和背景提升噪声。实际上，大多数转换器都不能达到理论噪声底限。因此，选择 A/D 转换器时，人们用转换器的长度来近似表征它的灵敏度。然而，对转换器全面性能的严格检测能够反映它的真实性能，因此在一些要求严格的应用场景中是必需的。

一旦信号用编码表示后，就可以使用其他的数字信号处理技术进行后续处理，比如滤波、时间漂移、频谱分析等。下一节将讨论这些数字信号处理技术。

### 1.3.5 数字信号处理

数字信号是在系统计算分析中用到的一系列数值。模拟信号在时间和幅度上都连续，采样后的模拟信号在时间上离散，在幅度上连续。数字信号在时间

和幅度上都离散。数字信号可以由软件产生，也可以通过 A/D 转换器直接从模拟信号获得。

从数学上来讲，信号可以用一个或多个独立变量的函数来表征。比如，从很多传感器得到的时变电压和电流信号就是由一个变量（即时间）组成的函数；电磁信号在笛卡儿坐标系中是时间和空间的函数。从传感器传来的信号需要经过分析来得到有用的信号。傅里叶变换和傅里叶级数是信号分析的两种通用方法，两者都可用在模拟域和数字域分析中。在这些分析方法中，信号被分解成一系列的正弦函数和复指数函数。分解是在频域中实现的，主要取决于频率分析工具。频率分析工具提供了各个频率分量的数学或图形表达方式，也就是频谱。频谱的分析主要由频率或频谱分析技术决定。傅里叶级数在代表连续时间周期信号时十分有用，而傅里叶变换在代表周期和非周期信号（比如有限能量信号）时十分有用。

在一些情况下，数字信号处理包括独立变量的变换。时间平移、映射、时间缩放是重要的处理方式。信号的时间平移常用在雷达、声波定位器、通信系统和地震信号处理中。信号映射在检测信号可能具有的对称属性时非常有用。时间缩放用来观察信号在扩展或压缩时域的特性。

数字滤波是一种广泛应用的数字信号处理技术。它用来滤除不需要的信号成分，比如噪声，换句话说是用来得到想要的信号成分，比如一个特殊的频带。两种最常用的数字滤波器是有限长冲激响应滤波器（FIR）和无限长冲激响应滤波器（IIR）。两者都很容易由微处理器系统和数字信号处理器来实现。

数字信号产生技术应用广泛，比如移动通信、传感器激励、复杂的信号处理设备和系统的测试及性能测量。信号产生应用于测量感性和容性参数的组成单元、漩涡电流元器件，并在调制和解调处理中作为本地振荡器。

## 1.4 传感器技术和先进的传感器

传感器和变换器是元器件及其应用系统的主要元素。它们产生与物理变化相对应的输出信号。传感器产生的信号经过适当的模拟或数字信号处理后，物理实体产生的有用信息能够被提取出来并被处理。传感器是由一系列的材料依照多种技术生产出来的。

### 1.4.1 传感材料

传感器可以由金属、聚合物、塑料、陶瓷、玻璃、生物材料、半导体或这些材料的混合物组成。

金属被广泛用来制造传感器。作为传感器材料，金属具有很多不同的特性。

它们可以是导体、绝缘体、半导体；可以是有磁性的，也可以是无磁性的；可以是导热的，也可以是绝热的；还可能是具有机械弹性的、脆弱易碎的、坚硬的、有光泽的、不透明的；还可以是化学催化剂、化学吸附剂，化学性质可能是活泼或不活泼的等。根据不同的物理变化的需要，大部分属性都在传感器技术中得到了利用。最常用的金属包括铝、铍、铜、铅、铂、金和锌。铝具有良好的导电性、导磁性和光纤属性。铍用在光纤和X光测量中。镁、铂和镍用在温度传感器中。铜和金具有良好的电和热特性，主要用在半导体和微传感器中。铅具有良好的压电、声和振动属性。锌用来作为主要的添加物，以提高一些合金的传感特性。

同样，作为主要的传感材料，以不同混合方式得到的金属合金也用在传感器技术中，特别是在温度传感器中。一个很好的例子就是镍铬合金（90%镍、10%铬）。金属及其合金具有良好的绝缘和极化特性。一些应用实例包括电磁和核放射测量，化学和生物测量。金属合金通常被用作压电的、焦热电的、电解的和铁电的材料，分别用来对机械压力和张力、光纤、化学激励和磁场做出相应的反应。

聚合物和塑料在传感器技术中有许多应用。它们由单体组成，彼此之间形成聚合物和聚苯乙烯的长链。聚合物和塑料的主要成分是碳，碳原子和其他元素结合在一起容易形成许多不同的材料。除了碳，只有其他七种元素可以用来生成多种形式的聚合物和塑料。这些元素分别是氢、氮、氧、氟、硅、硫和氯。把这些元素按不同比率进行组合，就能形成具有不同特性的适合作传感器的各种原材料分子。塑料在传感器中有很多的应用。比如，醇酸树脂具有良好的电特性和吸湿特性；环氧树脂具有良好的电特性。塑料还有一些其他的特性，比如压电特性就适合在压力、张力、振动和声音测量中应用。

陶瓷和玻璃是制作传感器的有用材料。陶瓷是由多种形式的金属碳化物和硝酸盐组成，具有良好的热稳定性，质量轻，抗化学药品，具有良好的结构力度和电特性。比如，金刚砂具有高绝缘性，广泛应用在电容传感器中。陶瓷也是微传感器工艺的基本元素。

玻璃基于硅酸盐系统，由三种主要的成分构成，即 $SiO$、$CaCO_3$ 和 $NaCO_3$。

为了获得不同的光学性质，玻璃被制成了许多不同的外表和形状，尤其是在中远红外线、可见光和紫外线波段。因此，玻璃在光敏设备制造中得到了广泛的应用。

生物材料主要用于感知化学物质和生化物体的存在。大部分生物传感器是由两部分组成的，一是生物激活器件；二是能量转换器件。生物激活器件与目标对象分子之间存在着一种特殊的交互作用，这种交互作用会释放出某种形式的能量，而转换器件则可以感知到这种能量的存在。生化传感器是根据它们各

自不同的物理和化学特性生产和使用的，例如基于抗体、基于生物酶、基于生化微电阻等。

由硅或者锗制成的半导体材料在现代传感器技术中得到了广泛的应用。硅是在现代传感器技术中应用最普遍的一种材料，尤其是在微传感器、智能传感器、片上系统设备上应用得更为广泛。硅具有良好的机械、化学和电气特性。硅是一种相对惰性的元素，只会与一小部分化学物质发生反应，例如卤族元素、稀释的碱液和氢氟酸。

硅的属性以及它在传感器技术中的应用已经得到了深入的研究。由于硅的各种良好的特性，使得硅在放射性监测、温度测量和光学测量方面，同时也在机械制造、电子、化学和电磁测量领域得到了广泛的应用。例如，在放射性和光学测量方面，硅体现出了良好的光电特性、光导特性和光磁电性；在温度测量方面，硅表现出了 Seeback 效应、Nernst 效应和温度对 PN 结的依赖性。由于硅对于一些特定的化学物质的敏感性表现在电阻、电压和其他一些属性的变化上，所以使得硅也可以在化学物质检测方面得到很好的应用。除此之外，硅还具有一些像 Hall 效应、磁质电阻和 Suhi 效应的电磁特性。

由于硅还具有良好的机械特性，因而被大量采用，用来制作压力转换器、温度传感器、力和触觉传感器等。薄膜和平板印刷照相技术的发展，使得可以将硅制成体积小、精度高的机械设备并且用于微传感器技术。显微机械加工技术可以将半导体材料制成用来感知加速度、力、压力、机械脉冲等的微型机械结构。此外，硅的压电电阻效应、压电效应、电容特性、谐振效应和热电效应使得它可以用在一些其他机械参数的测量上。

硅的一个最大不足在于它的各种特性对温度依赖过高。当外界因素如张力、光强和电磁等发生变化时，硅的一些特性参数与这些物理参数的变化呈非线性关系，而且还会受到当前温度的影响。然而，通过在晶状体结构中引入不同的元素和材料，可以极大地改善硅的物理特性。例如，通过在硅的结构中加入一层 ZnO 薄膜，可以加强它的压电特性，从而可以用它来制作加速计和表面声波（SAW）滤波器。

硅是地壳上除氧之外储量最丰富的元素。它主要以氧化物和硅酸盐的形式存在于砂石、石英、水晶和云母中。通过将硅石和炭放在同一个容器里面用电极电解可以获得纯净的硅。虽然还有很多其他的方法可以获得纯净的硅，然而用来制作固态半导体设备和微型传感器的硅主要都是用 Czochralski 方法获得的。

### 1.4.2　传感器的生产过程

传感器可以用各种不同的材料和处理技术来实现。传感器的制作可以根据用途、体积大小和复杂度的不同而采用不同的制作方法。许多现代传感器都是

基于半导体材料制造的，而且通常被制作为微传感器和超微传感器。

当前阶段，现代微型传感器的制作是通过充分利用半导体材料的性质以及与其相关的技术来实现的。在制作微型传感器方面，可以通过使用其他的材料以及喷镀各种厚度不同的薄膜使得感知材料具有一些它们原本所不具有的性质。例如，通过在硅制芯片上面喷镀压电薄膜，从而使它具有了压电特性。Spin-Casting、真空喷镀、真空阴极喷镀、电镀、网屏印刷等方法都可以用来在底片、硅质芯片等上面镀上一层或厚或薄的薄膜。

Spin-Casting 喷镀法主要是用于湿度测量和化学测量的有机物喷镀。这个过程主要是通过将镀膜材料溶解在一种挥发性溶液中，然后将这种溶液倾倒在高速旋转的样板上面，通过离心力的作用使镀膜材料在样板表面上能够均匀分布，当溶液蒸发完毕后，在样板表面上就留下一层薄薄的镀膜材料。虽然这种方法可以满足大部分应用的需要，但是在某些情况下，由于这层镀膜并不是完全均匀分布的，因而可能引起非线性或者其他问题。

在真空喷镀法中，镀膜材料是以气态形式被喷镀到样板表面上的。因为需要将镀膜材料加热到其熔点之上，所以真空喷镀系统是由一个加热室和一个加热机械装置构成的。镀膜材料以气态原子的形式在外界的控制下注入到加热室中，并喷镀到样板表面上。喷镀的厚度是通过蒸发时间和喷镀气体的压强来控制的。尽管如此，和采用 Spin-Casting 喷镀法时一样，薄膜在样板表面的分布可能不是均匀的，因而会出现由非线性而引起的一些问题。

真空阴极喷镀法与真空喷镀法相似，它在加热室里面注满了氩气或者氦气等惰性气体，并接入了外界高压电源提供的阴阳两个电极。等待喷镀的样板被接在电源的阳极上，喷镀材料则接在电源的阴极上。两个电极间的高压会使加热室里的惰性气体发生电离，被电离的气体离子则会撞击连接喷镀材料的阴极，当撞击目标的气体离子的动能足够大时，就会将阴极表面喷镀材料中的一些原子撞击出来，然后又通过被电离的气体将它们带到样板表面。采用真空阴极喷溅法可以实现更好的均匀分布，尤其是在有磁场存在的条件下。由于真空阴极喷镀法不需要很高的温度，因而对于有机物和多种材料的混合物都可以采用这种方法。

化学蒸汽喷镀法（CVD）是制造以半导体为基础的传感器的最常用的方法，得到了广泛应用，尤其是在光学设备和光电设备上。CVD 是在反应室里发生的，在反应室里，衬底和芯片被放在静止的或旋转的平台上。掺杂剂与一种运载气体例如氦气混合在一起进入反应室，衬底始终保持一定的温度，从而使掺杂剂能够附着在样板表面上。这个喷镀的厚度是通过运载气体中掺杂剂浓度、入口压力和衬底温度来控制的。

### 1.4.3　传感器技术和 IC 传感器的发展趋势

当前传感器技术的发展趋势主要是 IC 传感器，主要形式有微型系统、智能传感器、纳米传感器和其他一些形式，其中微传感器尺寸在微米范围内，而纳米传感器则在纳米范围内。微系统技术已经得到人们广泛的认可，通常被称作 MST。MST 具有很多不同的种类：一种是微型机电系统（MEMS），一种是微型光电系统（MEOMS），还有一种是片上系统（SOC）。采用 MEMS 和 MEOMS 技术制作的大部分传感器都是立体的，其尺寸范围大概都在几微米左右。

通过接口电路可以将传感器和变换器获得的数据转化成能够被人们所理解的形式。通过广泛地应用超大规模集成电路，可以实现复杂的传感器模块（例如微传感器）。在采用微电子技术之前，传感器和变换器都是通过相应的电路来与外界的读写设备相连接。然而随着微电子技术的出现，传感器和能量转换器都可以和其他处理模块集成在一块芯片上（通常的术语称之为 IC 传感器）。大部分传感器都可以不经过 A/D 转换器而直接与外界的微控制单元相连。这或者可以通过在传感器当中设置一个内置的数字输出接口或者将片上处理电子器件集成在感知单元内来实现。

半导体传感器的制作是基于微型制造技术，主要是一系列与制造 IC 有关的电子技术。IC 传感器具有接口简单、成本低、可以对电子控制系统提供一个可靠的输入接口等优点。IC 传感器的一个比较典型的应用是光敏二级管，如图 1-9 所示。当有光线落到反偏 PN 结时，这些光线所携带的能量会在 PN 结的两端形成一对电子空穴，从而可以用在电路中形成电流。由于由光敏二极管产生的电压是非线性的，因而可以通过在同一个芯片上加入合适的线性化电路和放大电路来改善它的线性特性。

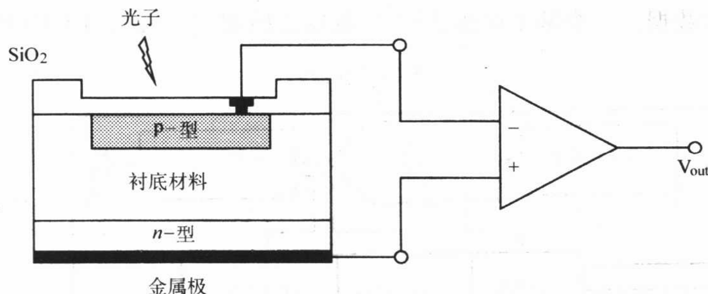



图 1-9　光敏二极管的典型结构

集成电路传感器可以根据它们的信号域来进行分类：

- 辐射域：传感器包含很宽的电磁放射频谱范围、可见光谱范围、原子放射性。例如，光致电压、光电子、光电导和光电磁传感器。

● 机械域：包括一系列从 MEMS 到触觉传感器的设备。例如，压电传感器、光电传感器和微型机械设备。

● 热能域：这一类传感器是以对温度具有很高的敏感性的半导体为基础的。在很多应用中，半导体器件对温度的敏感性是有害的，然而却可以将它的这种特性应用于温度测量和控制，有些器件的作用都是基于 Seeback 和 Nernst 效应。

● 磁域：通过使用掺杂技术和在半导体表面上镀上一层镍薄膜使它具有磁感特性，从而可以用它来制作磁感传感器。这种传感器主要具有 Hall 效应、磁致电阻和 Sushi 效应。

● 化学域：这一类传感器包括已经大量投入商用的半导体传感器。这一类传感器主要是基于离子场效应晶体管、对化学物质敏感的薄膜、聚合体等技术制造生产的。

通过将微处理器、微控制器、转换器、逻辑电路和其他一些数字模块集成在一起，可以极大地提高基于半导体的 IC 传感器的使用价值。此外，通过将微型机械加工技术和半导体处理技术结合在一起，可以将多个不同用途的传感器集成在一个芯片上，可以同时用于机械、光学、磁场、化学、生物学和其他类型的测量。数字技术的优点和 IC 传感器制造技术的低成本，必将引起元器件制造发生科技革命性的变化。

IC 传感器的一个比较典型的应用是微型机电测速器，例如由 Analog Devices 公司生产的 ADXL150 和 ADXL250。其中，ADXL150 是用一根轴来进行测速，而 ADXL250 则是用两根轴来获得当前的速度。此外，这些传感器在一个 IC 上都会有变换器组成单元和必要的信号波形整形器件。ADXL150 和 ADXL250 都会产生较低的噪声，并且可以提供很好的信噪比。通过这些传感器获得的数据都可以被合适的微处理器获得，例如，PIC16F874 就可以通过内置的 10bit A/D 转换器来获得这些数据。一个基于晶体管的 IC 温度传感器的结构如图 1-10 所示。

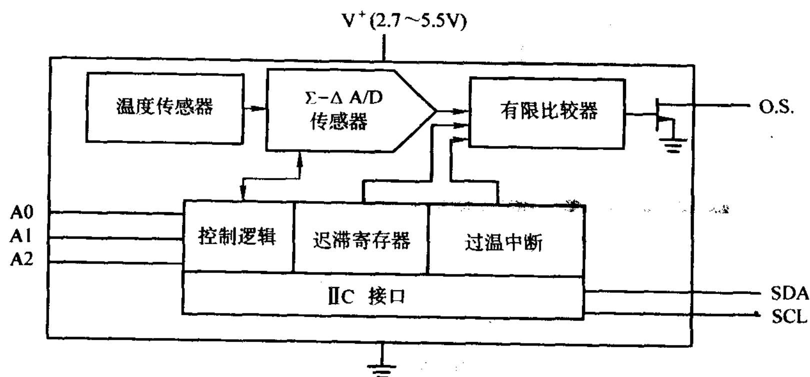



图 1-10　一个 IC 温度传感器

IC 传感器的另一个应用就是有源 IC（PIC）。PIC 是已经配置了内部传感器的数字设备。它们是将二极管和金属氧化物半导体（MOS）晶体管电路及金属氧化物场效应晶体管（MOSFET）技术相结合的产物。PIC 是通过将各种电路元素集中固定到一个器件中来实现的。这些器件一般都是离散器件或者一些具有离散输出设备的标准或者定制器件的组合体。在这个芯片上，这些电路元器件（例如，运算放大器、比较器和调整器）都是采用二极管 IC 技术制造的。MOS 电路可以对逻辑判断、有源滤波器和时延进行处理。其他一些电路，例如 A/D 转换器和功率放大器都可以利用二极管和 MOS 管技术进行设计。

有源 IC 的另一个优点是它可以直接将 MCU 与系统负载（例如，螺线管、电子管和电动机）连接在一起，这样可以提供更多的功能实体，例如复杂的诊断电路和保护电路。在进行各种故障检测的操作中，对电流大小和 PN 结温度的测量起着至关重要的作用。PIC 中的传感器可以对故障和门限情况进行监测，从而可以对温度、电流和电压等参数执行具有不同敏感度的控制策略。

许多其他的 IC 传感器系统是由离散的 IC 传感器或者多个专用 IC 组成的多个传感器或者印刷电路板组成的器件组成，而这些功能各异的传感器需要不同的接口器件。而这些接口的选取，则决定于需要测量的数据量、物理效应的类型、系统的整体结构和应用分类。

### 1.4.4 传感器分布和多传感器系统

在很多种测量中，为了达到目的，往往需要很多个传感器共同工作，传感阵列主要包括多个用于检测不同被测对象的传感器，例如压力、电流、温度和振动。这些不同的阵列可以用来扩大检测范围、提供冗余、捕获不同时间或不同空间点的信息。传感器阵列的一个很好的实例是在化学上，一个单独的芯片可以用来进行多种化学物质的检测。在当前，为了将所有必须的信号整形器件和计算能力集成在一个芯片上，研究与开发的重点都被放在了多传感器或传感阵列方面。

互补金属氧化物半导体（CMOS）技术的发展使得将多个传感器集成在一个芯片上成为可能，因而也使得它成为在传感器阵列中被普遍使用的一种方法。光敏二极管阵列、离子检测器、湿度检测器、静电释放传感器、张力测量仪、边缘损坏测试器和腐蚀检测仪等都是采用 CMOS 传感阵列的具体应用实例。

光敏二极管阵列是传感器阵列的一个比较典型的应用。光敏二极管是将一个 P 型硅制薄片放置在 N 型硅质基质上。通过在表面电极上加阴性电压引起 PN 结的反偏，从而可以在 N 型硅片区产生一个耗尽区，在这个区域中包含了不能移动的正电荷。当光线照射到这个耗尽区时，会在这个区域产生电子空穴对，并随着时间让电容进行线性放电。光敏二极管有两种不同的基本类型：串行交

换二极管阵列（见图 1-11）和充电耦合光敏二极管阵列。这些阵列的工作原理都是利用光敏二极管的光感特性来对电容进行充电，然后通过将它从寄存器中移出来读取电压。当把这一类的固定状态的图像传感器以 IC 的形式进行制造时，则会相当复杂。

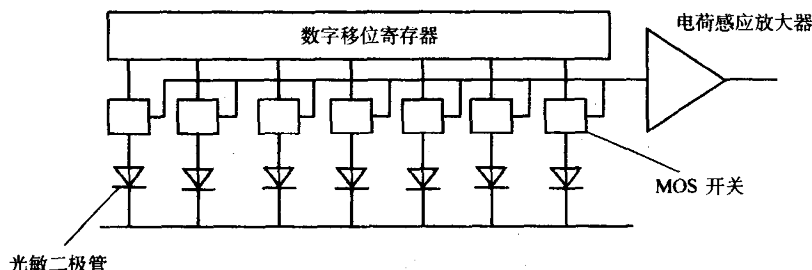



图 1-11 图像传感器

多传感器集成芯片现在正受到越来越多的重视。多用途的传感器集成芯片已经被用于对物理和化学变量进行同时测量。通过采用 IC 技术可以将高性能的模拟子系统（例如光放大器和数据转换器）和数字电路合并在同一个模块上，从而可以在一个单独的芯片上进行复杂的系统设计。这些设备一般都是采用 MOS 技术生产的，主要包括信号整形、阵列访问，以及红外传感阵列、化学传感器、测速仪、蒸汽测试仪、触觉感知阵列等。这些芯片的各种传感功能大多利用了氧化锌薄膜的热电效应和压电效应。

多传感器集成芯片组成了复杂的微型系统，这些微型系统需要高性能的微型电子器件和非电子的微型子系统。这些芯片可以进行如 MOEMS、MEMS、片上实验室、射频 MEMS、片上系统和数据存储 MEMS 等分类。对于其中的任何一种来说，都可以在微系统中引入各种不同的功能，从而使得系统的设计实现更加多样化。

## 1.4.5 智能传感器

最近几年来，由于微传感器、纳米传感器和智能传感器在测量系统中的集成化，使得元器件和专用元器件系统取得了令人瞩目的发展。传统的传感器可以对物理、生物或者化学参数进行检测，然后将获得的这些参数转换成电信号。这些传感器需要相当广泛的外部电路和设备来进行信号处理和显示。智能传感器的概念是在 1980 年左右提出的，这个概念的提出是为了能够与传统意义上的传感器相区别。智能传感器具有一定形式的智能，可以将纯粹的原始传感器信号转化成一种更便于使用的方式。智能传感器还可以提供数值补充功能，从而可以优化信号的质量而不仅仅将原始信号传出。现代智能传感器还具有如下功能：自我识别、自我检测、查表、曲线校准以及与其他设备通信的能力。所有

的这些额外的功能都是通过将传感器、微控制器、微处理器和逻辑电路集成在一个芯片上获得的。这个微处理器包含 RAM 和 ROM，而且还可以进行外部编程。智能传感器同样也包含信号放大器、整形、处理和 A/D 转换器。

将传感器、模拟和数字信号处理电路以及微处理器集成在同一个芯片上，使得支持软件获得了很大的发展。数字信号处理电路的使用以及像人工神经网络（ANN）等智能技术的集成，可以用作非线性信号处理工具，从而使得设备的使用更加方便和快捷。片上操作系统、额外的决策软件例如人工智能（AI）以及复杂的逻辑电路的使用，使系统操作更快捷、更有效、自动纠错、可靠。图 1-12 给出了智能传感器的一般结构。图中，传感器受控于微处理器。

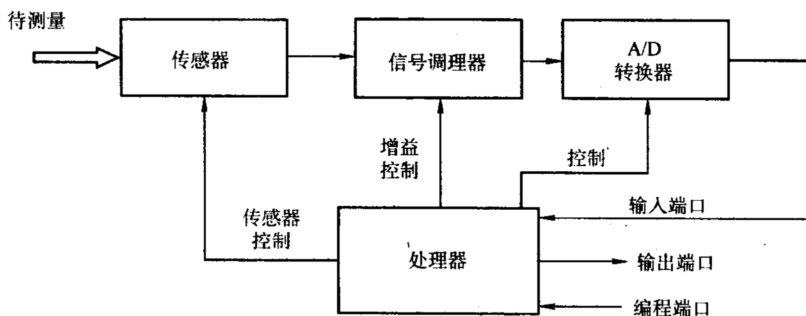



图 1-12　智能传感器框图

各式各样的智能传感器是利用神经网络以及其他一些在芯片上编程实现的智能技术制造的。这些传感器能够对大量的数据进行处理，而且还可以自主采用合适的操作来在不断改变的外界环境中实现自己的目标。这些传感器可以对处理过程中的事件及其复杂度进行预测，因此感知、学习和自我配置则成了进行这些处理的关键步骤。智能传感器可以被当作压力传感器、测速计、生物传感器、化学传感器、光学传感器、电磁传感器等使用。智能视觉系统和基于并行处理的传感器都是比较典型的实例。

ANN 可以在很多智能传感器中使用，包括单传感器系统、冗余传感器系统、多传感器系统以及完全集成的决策和控制系统。在单传感器系统中，ANN 的使用使得系统具有比采用传统的 IC 补偿更好的线性特性。

在冗余传感器系统中，通过采用 ANN 可以使相应的传感器测量的准确性和健壮性都得到极大的改善。在多传感器系统中，不同的传感器用于检测不同的物理信息，ANN 的使用可以改善每一个传感器测量的线性特性，并且可以对复杂的决策提供帮助。多传感器芯片的配置如图 1-13 所示。在一个高集成的决策控制系统中，ANN 既可以改善传感器的性能，又可以进行智能控制。高集成系统在宇航、国防、消费产品以及工业上都有很广泛的应用。

ANN 具有并行结构，可以很方便地在数字计算机上运行。网络拓扑、训练

算法以及参数优化都可以很容易地通过仿真包获得。一定的硬件结构和对应的软件结合，通过采用一定的数字处理器结构，定制使用 PC 扩展卡、阵列处理器以及专用 IC 设计都可以构成人工智能网络。Intel、摩托罗拉以及其他一些公司都已经发布了用来实现通用神经网络的专用 IC。从节约成本的角度出发，这些 ANN IC 的设计一定要考虑到当前已广泛使用的传感器种类、信号所需的带宽和训练需要等因素，以采用与上述因素最相适应的技术。

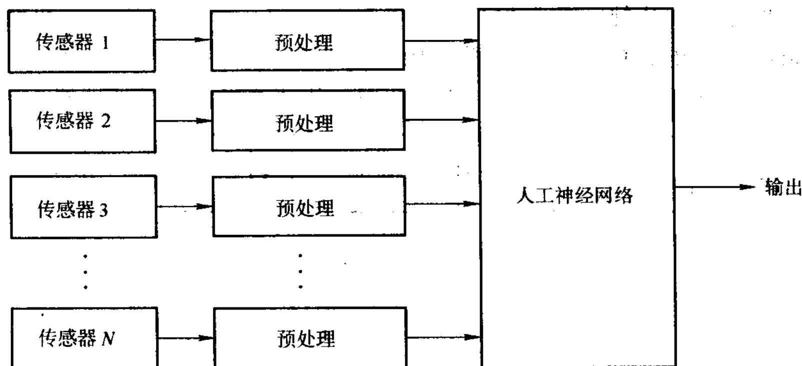



图 1-13 一个智能多传感器芯片的配置

NC3002 是基于数字 VLSI 并行处理技术的一种传感器。ANN 对传感器在质量判定和监测应用上面的支持，可以使得它们在机械学习能力和图像识别方面得到更好的应用。NC3002 的结构是由 Reactvie Tabu Search 学习算法指导设计的，Reactive Tabu 算法是后繁殖（Back Propagation）训练算法的一种有效的替代算法。这种算法不需要知道传输函数的导数。在单芯片或者多芯片配置的情况下，通过与一个标准 CPU 合作，这个芯片可以用作快速并行数据处理。

智能传感器的另一种比较典型的例子是智能图像传感器。这些传感器是基于单片集成 CMOS 技术制造的，主要包括片上 A/D 转换器以及合适的微处理器接口电路。这些类型的传感器是数码相机的重要组成部分。它与传感器、模拟信号整形电路以及片上存储单元结合在一起使用。在数码相机应用中，它们直接工作在微处理器总线直接控制之下。

## 1.5 元器件及传感器通信和传感器网络

随着通信技术的发展，元器件可以简单地实现网络化。许多处理过程都需要对数以百计乃至千计的数据进行测量。在一个复杂的处理过程中，进行所有的测量所需要的各元素的排列组成被称作一个测量系统。在一个测量系统中，各个元器件之间的工作是自发的，但是却是以一种平等的方式工作。由每个元

器件获得的信息不但可以在这些元器件之间或者元器件与控制器之间进行通信，而且还可以与其他数字设备进行通信，例如存储器、显示单元、打印机、路由器、基站或者主机。

在复杂的测量系统中，数字元器件之所以获得广泛的应用，主要有两个理由：

1）组网便捷，如通过无线射频（RF）、微波、互联网（Internet）和光纤技术等方式实现远程通信功能。

2）由于具有数据处理和存储的片上存储能力，通过使用有线和无线通信技术可以方便地在数据设备之间进行数据传输。

尽管如此，随着测量系统的测量规模越来越大，数据设备之间的通信也变得越来越复杂。为了降低这种复杂性，提出了基于一定硬件设备以及软件支持的信息交换标准，如 RS-232、USB、EIA-485 和 IEEE 488。

现在，许多元器件至少包括一个 RS-232 或者 USB 端口用于通信。此外，现在已有许多公司可以提供射频 RS-232 或 USB 系统来进行远程数据通信。它们采用了串行二进制数据交换，而且还可以专门用于进行数据通信设备和数据终端设备之间的连接。数据通信设备主要包括调制解调器，它主要用来将数字信号转换成适合在电话线上传输的形式。相对陈旧一点的 RS-232 采用标准 DB-25 连接器，在 DS-25 连接器中虽然安排了 25 个引脚，然而全部数据传输却只可以通过 3 个引脚——2、3、7 来完成。传输速率可以被设置为特定的波特率：1200bit/s、2400bit/s、4800bit/s、9600bit/s、19200bit/s 或者 38400bit/s 甚至更高。RS-232 可以用来进行同步或者非同步传输。信号电压是灵活多变的，当电压值在 $-3\sim-25$V 之间时，代表逻辑“1”；在 $3\sim25$ 之间时，则代表逻辑“0”。RS-232 是由电子工业协会在 1960 年第一次提出的，从那时起，为了满足多种不同系统的需要，RS-232 已经演变出许多种不同的引脚配置类型。

许多元器件设备都具有并行接口，因为相对于串行设备来讲，它们的速度要快的多。外围设备通常都是通过并行 I/O 端口来工作的。并行总线的结构决定了数据通路的宽度、传输速率、所采用协议、线长以及连接配置。IEEE488 是一种在各种元器件和专用元器件系统中非常常见的一种并行总线，主要用来对元器件簇和测量系统进行检测和控制。作为另一种并行总线，小型计算机系统接口（SCSI）将高速外部设备，例如硬盘，与主板连接在一起。

有很多种数据传输标准适用于工业应用，在工程和学术研究中，通常被称作现场总线。其中的一些已经得到认可和使用，例如，WordFIP、Profibus、Foundation 现场总线和 Lonworks。域总线可以通过硬件设备和软件来实现，通过采用高速协议来提高传输速率。

## 1.5.1　无线元器件通信

很多技术可以用来进行无线元器件间的通信，包括光波、红外、射频以及声音在内的很多领域都具有这样的应用。因为本书的主题是针对无线元器件和网络，因而将对射频通信进行详细的介绍。射频系统设计是一门涉及多学科领域的工作，需要对包括现代 IC 设计和实现在内的多个领域的基本原理有很好的认识和理解。这些与射频元器件的设计与实现相关的领域如图 1-14 所示。

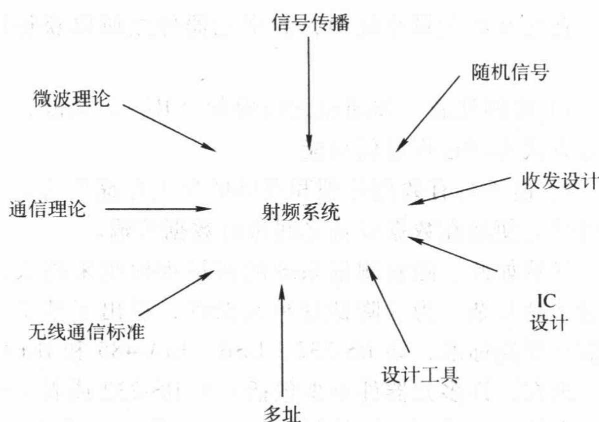



图 1-14　射频设计需要的理论知识

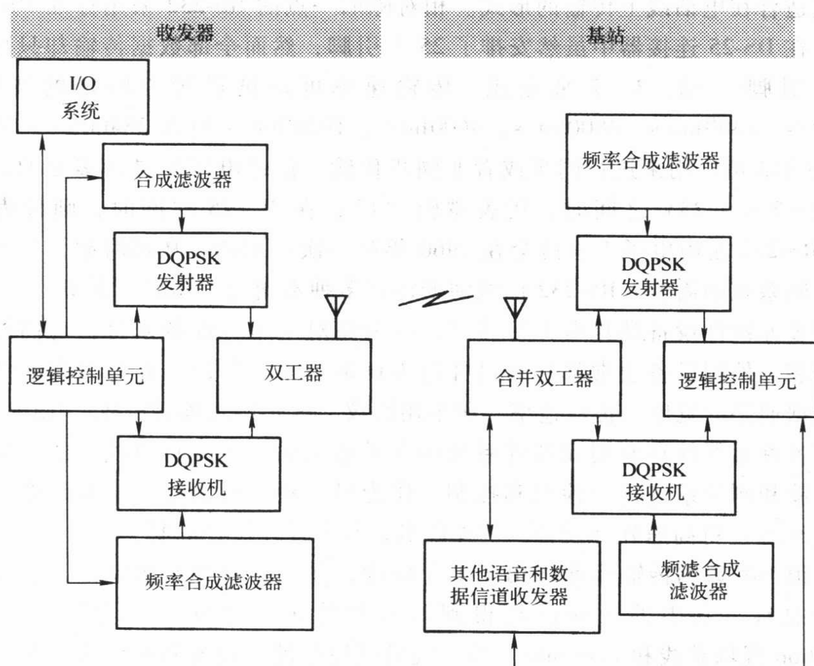



图 1-15　在无线电话系统中，一个发射机和基站的结构图

在设计过程中，要尽可能选择毋须定制的、使用广泛的器件。对 IC 芯片的选择也要让它在尽可能多的结构中是通用的，这样就在系统级和链路级引入大量的超静定性。典型的射频发射器和基站的器件如图 1-15 所示。

模拟和数字射频电路需要能够对高频范围内的具有很大动态范围的信号进行处理，信号需要转换成适合传输的形式，对噪声、功率、线性特性、频率、增益和供给电压也都要进行综合考虑并寻求它们之间的均衡。

数据进行长距离的传输需要一定的硬件和软件支持，例如调制解调器、微波和射频设备。在接收端，合适的硬件和软件设备会对接收到的信号进行译码并获得其中的信息。通过使用各种调制技术可以将数据信号转化成为合适的形式，以便于传输。例如，大多数使用中速异步数据传输的调制解调器采用的是 FSK 调制方式。根据数据流的方向，调制解调器的数据接口可以采用如 MIL-STD-188C 等多种传输协议，以单工、半双工、双工的方式进行数据传输。单工数据接口在一个方向进行数据传输，全双工方式同时在两个方向进行数据传输。

在进行射频电路设计时，由于计算机仿真和分析工具不能方便使用，因此需要采用一些其他的方法对电路进行建模和仿真，以此来观察整个系统或者其中特定部分的性能。

### 1.5.2　元器件信号的调制和编码

为了更方便地进行通信，需要通过波形编码、信源编码或者将两者相结合，将由元器件产生的模拟信号转换成数字信号。波形编码将波形信号的幅度转换成对应的二进制序列，采用对应的调制技术对此二进制序列进行适当的调制。信源编码可以对信号波形一个特定的属性进行建模和抽样。然后接收端可以根据接收到的传输信号将其恢复成原来的信号。对一个确定应用信号编码的选取，要根据可用的射频频带和期望的信道质量进行折中。

波形编码是通过对模拟信号进行抽样，然后通过 A/D 转换器将其转化为数字信号。A/D 转换器的操作已在 1.3 节给出。尽管如此，尤其在射频传输时，应使用脉冲编码调制。脉冲编码调制可以将基带模拟信号转化为基带数字信号进行传输，如图 1-16 所示。在信号编码调制中，最常使用的编码调制方式有脉冲持续时间调制（PDM）、脉冲位置调制（PPM）、脉冲编码调制（PCM）、脉冲幅度调制（PAM）和 Δ 调制（增量调制，DM）。

PDM 通常也称为脉冲长度调制（PLM）或者脉冲宽度调制（PWM），模拟信号的幅度信息是通过抽样信号的持续时间来表示的。

PPM 也称为脉冲相位调制（PPM）。在这种调制方式下，均匀的脉冲是根据原始信号的幅度来按照比例分配的。这种调制方式可以在发送端和接收端实现很好的同步，它需要一种直流转换器来处理原始信号的负值幅度。

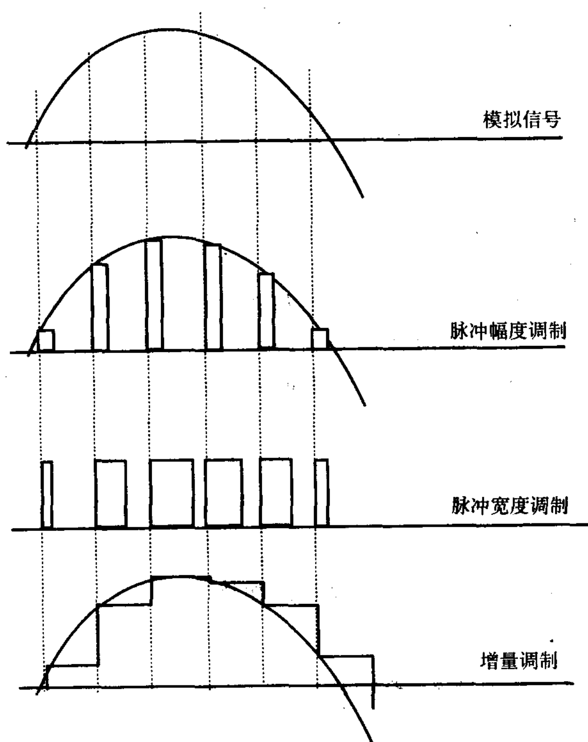



图 1-16 编码实例

在 PCM 中，原始信号是采用 PAM 方式进行调制的，然后转换成二进制形式并以数据流的方式进行传输。这种方法会产生一定的量化误差和量化噪声，如 1.3 节所述。

在 PAM 中，通过对模拟信号进行抽样得到脉冲信号，此脉冲信号的幅度与抽样时刻模拟信号的幅度是成比例的。这种方法容易引起噪声而且传输效率不高。

Δ 调制是根据前后抽样值幅度的变化来进行调制的。当目前的幅度值比前一个幅度值大时，就传输“1”；当目前的幅度值比前一个幅度值小时，就传输“0”。从准确度的角度来看，为了能够更好地代表模拟信号，抽样步长（也就是 Δ）的选择也是很重要的。如果抽样步长选择过短，会引起过载；如果选择过长，会引入大的量化误差和颗粒噪声。

将不同的调制技术相结合，就可以产生自适应增量调制（ADM）技术和可变增量调制［例如可变斜率增量调制（VSDM）］技术，从而提高了系统的效率并且降低了噪声。

信源编码通过量化、熵编码、预测编码和变换编码等方式对数字信号进行

压缩。在进行量化编码时，可以通过采用各种压缩技术来减小固定长度 PCM 的码字长度。熵编码根据信息、消息和数字出现的频率来为它们安排码字。熵编码具有多种不同的形式，例如霍夫曼编码和算术编码等。

预测编码是通过利用连续的抽样值之间的相关性，通过联合使用量化编码和熵编码来给出在时间和空间上的预测值。

转换编码会将一组抽样值转化为它们对应的频率信息，以便进行量化编码和熵编码来传输。大多数普遍应用的技术都采用波形转换或者离散余弦变换（DCT）。

### 1.5.3 无线通信系统实例

手提蜂窝移动电话都采用了 RF 通信技术，蜂窝移动通信系统中的无线元器件应用广泛，并且非常重要，主要有两个原因：

- 在实际系统中，存在使用蜂窝网络结构的专用元器件系统；
- 蜂窝技术可以直接应用于专用元器件系统。

因此，蜂窝技术中的一些知识和经验可以直接应用于专用元器件系统。

通过采用有效而高效的复用技术，上百个移动电话可以同时工作。现在有 3 种不同的复用方式：频分多址（FDMA）、时分多址（TDMA）、码分多址（CDMA）。FDMA 系统主要应用于模拟通信系统，代表着第一代移动通信系统所使用的技术。TDMA 系统代表着第二代移动通信系统所使用的技术，可以在有限的带宽范围内增加信道的数量，提高系统容量。CDMA 系统通过使用扩频技术可以进一步提高信道容量。表 1-1 给出了现在主流的几种蜂窝移动通信系统的主要特性。

表 1-1　蜂窝移动通信系统特征

| 性质 | AMPS<br>北美 | IS-54<br>北美 | IS-95<br>北美 | GSM<br>欧洲 | PDC<br>日本 |
|---|---|---|---|---|---|
| 接收频率/MHz | 869～894 | 869～894 | 869～894 | 935～960 | 940～956<br>1477～1501 |
| 发送频率/MHz | 824～849 | 824～849 | 824～849 | 890～915 | 1429～1453 |
| 接入方式 | FDMA | TDMA/FDMA | CDMA/FDMA | TDMA/FDMA | TDMA/FDMA |
| 双工方式 | FDD | FDD | FDD | FDD | FDD |
| 信道数量 | 30 | 30 | 1250 | 200 | 25 |
| 信道间隔/kHz | 832 | 832 | 10 | 124 | 1600 |
| 比特率/（kbit/s） | | 48.6 | 1228.8 | 270.83 | 42 |
| 调制方式 | FM | π/4 DQPSK | BPSK/OQPSK | GMSK | π/4DQPSK |

在北美，联邦通信委员会分配了两组频率，A 组用于无线公共通信系统，B 组用于有线通信系统。模拟和数字蜂窝移动通信系统的带宽都是 30kHz，所以在 824～894MHz 带宽范围内可以提供 832 个发送信道和 832 个接收信道。

### 1.5.4 无线传感器和元器件实例

现在有很多公司提供多种无线传感器和元器件，他们为他们的产品提供了无线解决方案，并且提供了可以工作在有许可证的频段以及免许可证的工业、科学和医学（ISM）频段的专用无线传感器和无线元器件。无线通信系统可以应用于很多领域，例如野生动物栖息地的检测系统、环境监测系统和健康监测系统。第 4 章和第 5 章将会给出多种无线传感器和无线元器件以及它们的应用。

## 1.6 工业元器件系统

随着通信技术的发展、数字控制技术的进步以及现代传感器和变换器的大规模应用，复杂的工业元器件系统已经可以应用在自动控制、制造业、处理工业以及其他相类似的行业中。在工业应用中，元器件网络以及它们的控制功能很大程度上取代了现场总线的功能。

现场总线是一种工业通信系统标准，既可以由一个或几个公司联合设计，也可以由个人或者政府机构设计。例如，日本富士电器公司在专用元器件控制领域研究出了一种开放型系统并且提出了现场总线技术标准。富士电器公司在研究现场总线规范、硬件发展、应用改善以及公共关系方面花费了很多年的时间，并且还成立了光学总线工作组，现在该组的工作已经结束，其成果也已经作为现场总线的一种最终规范。在一般现场总线技术的发展过程中，有很多类似于富士电器公司的例子。

尽管如此，在现场总线的发展历程中，很多种不同的方案会被采用，在市场上总共有超过 50 多种不同的现场总线的产品和标准，这些产品和标准都曾经在会议或者杂志或者展览上被报道或展出过。表 1-2 给出了最常见的几种现场总线。其他一些没有在表中给出但很重要的总线产品有 I/O-lightbus、IEC 61158、P-NET、INSTA（EIB）、Modbus、Bitbus、Arcnet 和 HART 等。

表 1-2 最常见现场总线举例

| | |
|---|---|
| 研究 | |
| MPS(Michigan Parallel Std. ,MSS) | University of Michigan |
| $I^2S$ | Delf University of Technology |
| 工业 | |
| Foundation Fieldbus HSE/H1 | Fieldbus Foundation |
| DeviceNet | Allen-Bradley |
| IEC/ISA SP50 Fieldbus | Fieldbus Foundation |
| LonTalk/Lonworks | Echeleon Corp. |
| Profibus DP/PA | Siemens |

（续）

| | |
|---|---|
| 工业 | |
| InterBus-S | InterBus-S club, Phoenix, AZ |
| WorldFIP | WorldFIP |
| 汽车 | |
| CAN | Bosch |
| MI-Bus | Motorola |
| J-1850,(CAN),J2058,J2106 | SAE, Chrysler, General Motors |
| 家庭自动化 | |
| Smart House | Smart House LP |
| CEBus | EIA |
| 楼宇和办公自动化 | |
| BACnet | Building Automation Industry |
| IBIbus | Intelligent Building Institute |

现场总线技术的使用，使得现场设备之间以及它们与计算机或者其他数字设备之间的连接成为可能。由于它的使用，使得工业系统可以使用一定的硬件和软件，将模拟和数字现场设备集成在一起，用于信息交换和控制功能。通过软件和硬件，现场总线成为了沟通模拟和数字设备的桥梁。

现场总线技术协议主要都是根据集中控制式分布式处理（如 IEC/ISA 和 FIB）以及分布控制式分布式处理（Profibus）这两种不同的方法提出的。由于利益的驱动以及面向应用的需求，仍有很多不同的厂家提供着很多种不同类型的总线。尽管如此，现在全世界都在努力来实现现场总线技术的标准化，使它不再依赖于制造商和某种特定应用的需求。虽然这种公共标准在 2000 年已经在 IEC 61158 标准中实现了，但是它的影响和可接受程度仍然需要经过时间的考验。公共现场总线可以实现全局控制策略，从而能提高系统固有的安全性，提供更好的安全保证，使设备安装、维护、监测和故障诊断更加便捷，增强设备的协同工作能力，降低厂家生产成本，从而也就降低了最终消费者的成本。需要注意的是，新兴的无线通信技术很可能取代大多数现存的现场总线。

IEC 61158 工业总线标准至少基于 6 个子标准：ControlNet、Profibus-PNet、Foundation Fieldbus、SwiftNet、WorldFIP 和 Interbus。这个标准共分为 7 个部分，第 1 和第 2 部分是总体介绍和主题安排；第 3～6 部分则是对国际标准组织/开放系统互连（ISO/OSI）模型的数据链路层到应用层进行了介绍。IEC 61158 主要是为了能够保证设备之间通信的可靠性而设计的。然而，标准功能体和用户层编程语言支持的增强是由其他协议来补充的，例如，IEC 61131-3、IEC 6184、IEC 61499 等。

### 1.6.1 工业通信系统

现场设备通过现场总线连接在一起，如图1-17所示。在一个完整的现场总线的配置中，将各种器件例如传感器、元器件、模拟和数字器件等连接到系统中，并对处理过程进行测量、监测和控制。这些互连的现场器件可以分为三大类：①传统的模拟和离散的I/O设备；②模拟和数字混合设备；③全数字设备。模拟设备主要通过电流为4～20mA专用环路与控制器相连；混合器件既可以使用数字通信技术，又可以使用模拟通信技术。例如，HART协议采用数字通信信号来传输传统的4～20mA模拟信号。第3种类型，纯数字设备通常需要数字接口硬件以及相应软件的的支持，例如，RS-232、USB、IEEE 488并行总线等。

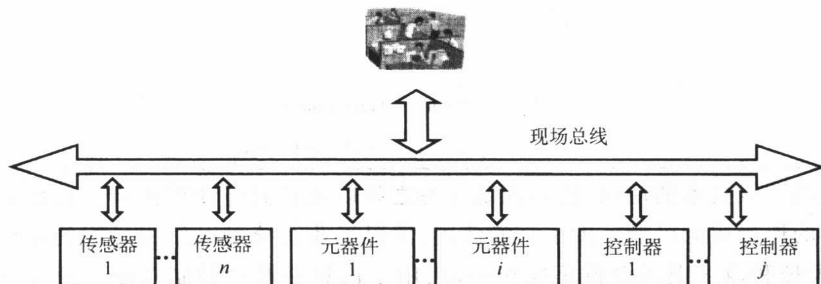



图1-17 与现场总线相连接的传感器、元器件和控制器

为了能够跟踪最新技术的发展，通信过程的一部分可能是通过新的有线通信技术来实现的，例如$I^2C$或$I^2S$（集成智能传感器）总线等。这些总线一般具有如下特性：

- 结构简单，只需要两根通信线路（时钟线和数据线）；
- 在全工作方式下，只需要很少的电子器件；
- 主机和从机都可以终止通信。

现在，很多元器件和智能传感器采用无线技术进行通信，这些技术采用的标准和协议主要包括蓝牙、超宽带射频、IEEE802.11a/b/g、通用分组无线业务（GPRS）、ZigBee、IEEE802.15.4和IEEE1451.5等。当进行射频通信时，可以采用标准或者非标准的方法，这些方法的选择主要决定于应用的需求、元器件的复杂度和主系统的容量大小。

### 1.6.2 工业传感器网络的基本元素

现在，随着先进微处理器以及它们的支持器件的成本降低以及可用性的增强，越来越多的传感器基于强大的数字系统设计，这些数字系统集成在不同的层面上，从感知元素到通信网络。因此，微处理器、微控制器和数字信号处理器是现

场总线在互连过程中至关重要的组成部分。微处理器的使用允许传感器和控制器进行自我支持或者半自动化,它们可以在中心控制器的指导下做出局部的决定。微处理器还提供了方便的人机接口、诊断能力、自我配置能力和自我识别能力。

数字化和计算机化系统都使用了几乎所有的现代现场总线。大多数的传感器依旧只是产生模拟信号,因而在系统中需要 A/D 转换器。同样,由于很多控制器需要使用模拟信号,因而从总线上获得的数字信号需要被转化成为模拟信号的形式。图 1-18 给出了从传感器连接到数字网络所需要的典型元素,这些组成元素在 1.3.4 节中已经进行了详细的介绍。模拟信号处理器的前端是为了对由传感器产生的模拟信号进行放大、衰减和滤波。除了模拟信号处理过程之外,还需要进行 A/D 转换,这个过程是在合适的 S/H 设备和多路复用设备的帮助之下进行的。多路复用设备可以将多个传感器和变换器连接到同一个信号处理媒质上。对于信号激励和信号控制来说,数字信号通过 D/A 转换器转换成模拟信号波形,并进行滤波,然后才会送到控制器。

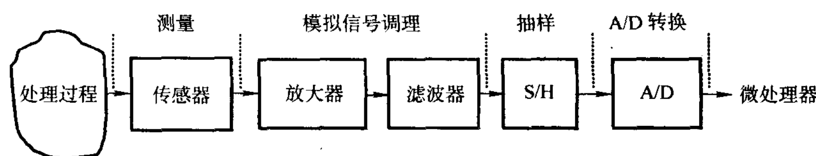



图 1-18　传感器主要组成

## 1.6.3　工业网络协议

通过将现场元器件连接到数字系统和计算机,可以组成不同的工业网络,例如,直接数字控制(DCC)系统、管理控制(SC)系统、分布控制系统(DCS)、混合控制系统、管理控制和数据采集(SCADA)系统等。这些互连的设备通过专门的公共总线网络进行通信,并采用了各种通信协议,通过使用这些协议来保证在各个器件之间传输数据流的准确性。在一个工业系统中,不同的控制单元也许需要共享来自于同一个传感器的信息,并且需要将处理后的数据分布到不同的激励单元。例如,在一个核工厂,当有危险信息被检测到时,会有很多不同的单元要求被关闭。从这方面考虑,正在运行的属于不同组群的设备之间通信的有效性将非常重要。在现场总线系统中,这种类型的通信通常是通过采用快速数据链路层协议来实现的。这个协议可以提供一系列的设备,用来帮助应用进程确保实时操作需求能够被满足。

在通信过程中,传感器产生的信息可以分为长信息和短信息。其中,短信息通常可以在局部处理;而长信息则需要通过中心计算机或者其他远程设备进行处

理。信息的长度和类型在现场总线配置中是十分重要的。现场总线是信息收集、数据流程以及在控制下进程判定的第一步。例如，将现场总线和计算机辅助设备管理(CAFM)系统集成在一起，或者将现场总线系统集成到分布式面向对象系统中。

在节点间、独立的元器件间和计算机间的数据流都是通过协议来控制的。根据电气与电子工程师协会(IEEE)网络协议的定义可知，为了保证用于交换的信息能够被正确地接收和解释，通信双方都应该坚持遵守一系列的惯例或规定。大多数工业通信系统都是采用 ISO/OSI 七层参考模型，简称为 OSI 参考模型或者 OSI 栈。3.3 节和 3.4 节将会给出 OSI 系统模型的详细介绍。OSI 参考模型共分七层，其中的每一层都是一个独立的功能实体。每一层在低于本层的层面提供的功能上面加上自己的需求，构成本层的功能，并为上一层提供服务。最低三层是与网络相关的，最高三层则是与网络无关的(面向应用的)，而中间层(传输层)则是两者之间的接口。大部分现场总线只在这些层中的一些层中使用，包括物理层、数据链路层、网络层和应用层。

## 1.6.4　以太网和现场总线

近些年来，在工业自动化领域中，一个具有显著意义的技术变革是现场总线的采用以及个人计算机大规模的使用。这些技术变革使得信息的分发可以通过使用 TCP/IP 端口在以太网上进行。图 1-19 给出了一个具有通过以太网进行连接的多个单元组成的现代工业系统。每一个单元都是由一个或者多个现场总线、个人计算机(PC)、可编程序逻辑控制器(PLC)以及其他构成 DCS 所必需的元素所组成。

以太网的 TCP/IP 是未来工业通信协议的趋势。因为以太网具有很多优点，例如，成本低和在一个特定网络中能配置更多的设备，所以以太网已经得到了很

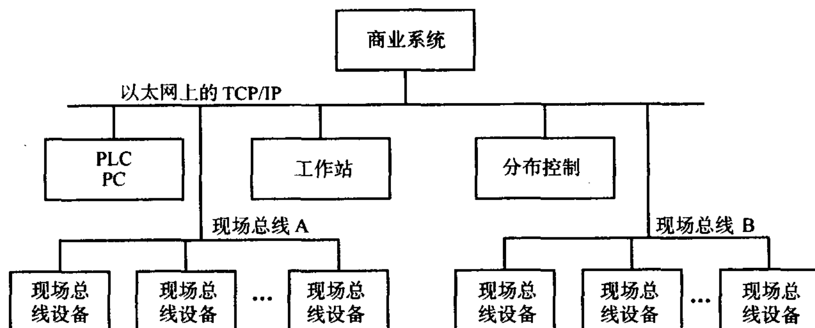



图 1-19　典型现代工业元器件系统

好的理解并被广泛应用。以太网提高了不同范围内设备协同工作的能力，而且使得商业网络和工业应用网络可实现更高的集成化。扩大企业的办公室通信网络，具有广为人知的好处和低成本的投入。通过实时获得当前的生产数据，可以提高生产能力和降低存货，同时，通过对用户订单的及时追踪可以提高可预见性来避免薄弱环节。除此以外，还可以用于安全和维护。

具有以太网和 Internet 连接的现场总线的实现，可以对设备和整个系统进行远程控制，有很多实际系统将这两者的优点组合到一起来实现优势组合。一些原本为 Internet 设计的协议也可以用来实现这个目的。这种组合可以保证现场总线系统可以同世界上任何地区的局部或全球计算机网络相连接。

### 1.6.5 现场总线的实现

现场总线的实现同时需要硬件支持和软件支持，并且需要在这两者之间寻求一个均衡。大多数现场总线具有可以执行全部或者部分系统参数的芯片。例如，在 LonWorks 协议中，所有协议层都是通过芯片和相关软件实现的。软件定义了所有的对象和容易被用户使用的类库，但是对 CAN 来说，最低的两层是通过协议芯片（82C200）实现的，而其他所有的软件则是用户自己来实现的。

因为生产厂家为现场总线提供了不同形式的硬件和软件支持，所以现场总线的执行因系统而异。同样，处理过程的类型和需求也不相同。为了能够介绍现场总线执行的典型特性，下面以基本现场总线（Foudation Fieldbus）为例来介绍相关内容。

基本现场总线是一种全数字、串行、双向通信系统，它将传感器、激励器、控制器和计算机等现场设备连接在一起。它本质上是一种元器件局域网，这些元器件应用在生产工业、自动控制工业和处理工业中，这些工业都有将控制请求在全网进行分布的内置功能需求。它被一个叫做现场总线基金会（Fieldbus Foundation）的独立非盈利公司所支持，该公司由 100 多家世界级的主流供应商、制造商和最终消费商组成。基本现场总线创立于 1994 年，是两家主要的机构——可互操作系统计划（Interoperable Systems Project，ISP）和北美 WorldFIP（WorldFIP/North America）共同努力的结果。其委员会是由国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）和工业标准结构（Industry Standard Architecture，ISA）的成员组成，IEC 和 ISA 分别得到了德国 Profibus 总线和法国 FIP 的支持。

基本现场总线特别适用于那些以短帧周期交换进行通信的系统。然而，纯粹的短帧周期交换还不足以满足该过程的所有通信要求。考虑到这一点，由应用层通过媒体接入机制提供的通信模型在数据链路层也适用。因此，异步消息（例如，警告、操作命令等）的传输和同步传输一样得以实现。这一点正是定义该协议的关键，因为只有正确地对应用层的通信模型和数据链路层机制进行映射，才能够

保证这些过程在时间上的严格同步要求。

基本现场总线的一个重要特征就是定义了输入、输出、模型化结构设计和用于公共控制系统的事件子系统的功能块。这些功能块提供了对标准控制系统函数建模的可靠和易行的方法。如果考虑到控制计算机，那么这个系统就可以看作是函数块的集合而不是设备的集合。基本现场总线的一个重要贡献就是增加了灵活性，这种灵活性体现在创造了能够按照自己方式存储和运行软件的现场设备。正是这些智能设备的使用，使得功能函数块允许现场设备之间存在处理功能的分配和整合，这就令现场总线有能力为整个工厂的维护和高效运作提供工厂资产管理（Plant Asset Management，PAM）。

基本现场总线拓扑包括两个部分：一个是低速现场总线，称为 H1；另一个是高速现场总线，称为 H2。这两个现场总线能够通过称为网桥的设备进行连接。该设备描述也已经被标准化，它允许控制系统获得来自总线设备的消息定义。基本现场总线配有设备特征的信息，例如制造商详情、支持软件的能力、可用的函数块和诊断能力。这些信息是用设备描述语言（DLL）开发的，该语言源于 HART 协议。这样做的目的是为了使厂家可以以一种标准化的方式来描述他们的设备功能。制造商也可以为设备添加新的能力和特征，并且能够让这些设备很容易地为已安装的系统和新的用户所接受。

### 1.6.6 现场总线设计和应用示例

现场总线在各种工业中都有广泛的应用，从汽车制造行业到复杂的由成千上万的传感器、变换器和控制器组成的设备制造行业等。许多公司只提供与某种现场总线或某几种现场总线可操作的产品。然而，也有一种很强的趋势倡导生产结合多种现场总线，能够协同工作的产品。举个例子，位于密歇根州史德林的系统集成专家公司（SISCO）提供了包括自适应卡、服务器、接口板、编程工具、总线分析器和协议源代码等在内的广泛的现场总线产品，这些产品适用于多领域的多种现场总线。该公司还提供了诸如压力变送器、温度变送器、可编程序逻辑控制器、总线-电流转换器、总线-气动信号转换器、电子管和其他附件等测量设备。他们也生产用于远距离传感器和传动装置接入的无线连接产品。

现在有很多制造商以竞争性的价格提供用于现场总线系统的各种 IC（集成电路）和芯片组。比如说，产自摩托罗拉和东芝的本地操作网络（LON）芯片的价格已经低于 5 美元了。然而，考虑到运行速度和响应时间，CAN 芯片更加可靠，并且被广泛地用于汽车工业。CAN 芯片主要由英特尔、摩托罗拉、飞利浦等公司生产。

在实验室环境下，作者实现了如图 1-20 所示的 CAN 协议。CAN 是一个覆盖了 ISO/OSI 模型中物理层和数据链路层双层协议的实现方案。为了实现基于 CAN 的网络，需要定义应用层，另外网络连接也必须详细说明。实验室中的该系

统处于安全考虑包含了许多传感器和传动装置。在众多的 CAN 控制器中,选择了飞利浦公司生产的 82C200 芯片。

在 CAN 方案中,网络是通过三个子层来实现的,它们分别是数据链路层的逻辑链路控制(LLC)子层和媒体接入控制(MAC)子层。这种类型的 CAN 能够实现传感器、传动装置、人-机接口、控制器和其他控制装置之间的消息互相通信。该结构为实现高速、实时的集中式或分布式控制平台提供了一个通信环境。

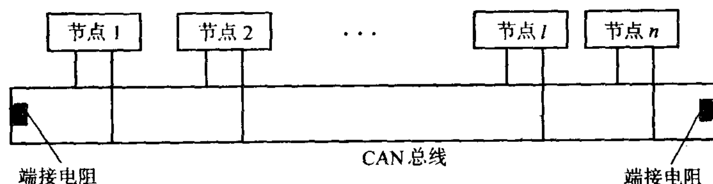



图 1-20　实验室环境下的一种典型 CAN 网络设计图

设计一个现场总线系统需要对被监测和控制的过程有很仔细深入的理解。一旦定义了测量、监视和控制目标,如何选择合适的现场总线,就取决于系统的成本和对于现有工厂设备来说所选现场总线整合的容易度。正如表 1-2 所示,对于特定的应用必须选择合适的现场总线,例如,用于智能建筑的 BACnet、用于工业应用的 Profibus 等。一旦选定现场总线,就必须严格按照制造商提供的安装、调试和维护的说明书进行操作。在选择过程中,很重要的一点是不同制造商生产的传感器和设备的互操作性需要联合考虑。

现场总线的实现可以有多种选择,这取决于应用的需求。图 1-21 给出了在工业自动化和过程控制领域市场上的几种总线。现场总线可以通过传统的有线方式或者新的无线技术来实现。现场总线的无线实现随着许多新的设备拥有无线通信特征而变得日益流行。采用无线通信系统传输的最流行的方式是通过 LAN 适配器、无线调制解调器和分组控制器来实现,这些方式的不同在于传输过程中数据的处理方式不同。

无线传输设备的采用,创建了完整的无线通信网络或者是在有线通信网络中采用无线层实现了部分的无线通信网络。简单的现场总线,例如那些基于 RS-232C 标准(如 Modbus)的现场总线,可以通过无线调制解调器或分组控制器的使用而得以实现。

如果网络比较复杂或者需要更高的传输速度,那么可以使用 LAN 卡或更强大的处理器。大量的报道(例如 2002 年报道的 Liptak)给出了在 LonWorks、CAN 和 FIP 等网络中使用的无线传输技术。无线传输同样也包括在基本现场总线的标准中。

另外一种现场总线的实现是指在现场总线中使用了模糊组件网络,例如模糊

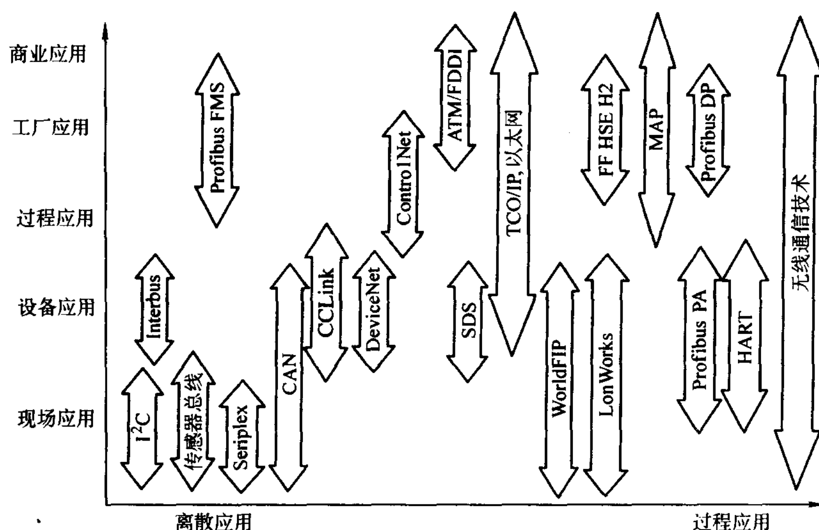



图 1-21 用于工业环境的几种现场总线

传感器、模糊传动装置和模糊接口。这些模糊组件是以组的形式组成模糊小区的，各个模糊小区能够根据配置的不同而完成一个或多个模糊组件的功能。模糊小区是以其处理和交换模糊象征信息的能力相区别的。它们的配置可以由使用了一些语言的现场总线来完成，例如，象征传动装置和传感器整合语言原语（PLICAS）就是出于该种目的而设计的。PLICAS 编译器整合到了各个小区内部，使各小区具有互操作属性功能。

在对时间要求比较严格的通信系统中，Hopfield 神经网络（HNN）得到了广泛应用。在这些系统中，安排好合适的调度顺序是非常重要的。通常调度序列的长度和处理器周期的最小公倍数相同，并且需要保存用于后续实现。在该过程中，如果序列太大，就会导致一些问题。序列中，计算复杂度的上升问题可以通过采用在现场总线中整合 HNN 来克服。

## 1.6.7 遥测和 SCADA 系统

遥测是一种用于在远地搜集信息并且将数据发送到合适地点的无线通信技术。遥测可以通过不同的方式来实现，例如光、机械、水力、电力等。最近，光纤系统的使用使得宽带带宽的测量得以实现，并且对于噪声和干扰有很强的抵抗力。其他被提出的遥测系统还有基于超声波，电容或磁耦合，以及红外线辐射的，但是这些方法并没有得到正式地采用。

本节的讨论局限于最常见的遥测系统，它们基于电信号和信息的无线传输技术。在许多工业应用中，无线遥测因为需要 RF 或微波能量用于信息的发送和接

收而更加复杂。无线传输的应用场景往往是那些无法正常到达的区域,或者以移动形式发送或接收信息的系统。一些无线遥测单元有能力同时传输多路信息。

图 1-22 给出了一般的遥测系统。遥测系统的主要组成部分和功能如下:

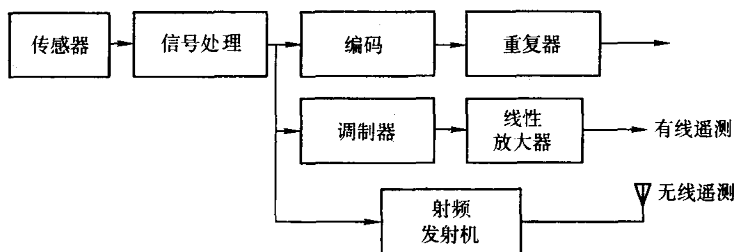



图 1-22　遥测系统的基本组成

- 变换器,将待测量的物理变量转换成易于处理的电信号;
- 信号调整电路,放大由变换器输出的弱信号,并且限制其带宽,调整阻抗水平;
- 子载波振荡器,由不同变换器输出的信号在处理和调整之后进行调制;
- 编码电路,可以是数字编码器、模拟调制器或数字调制器,将信道调整到适合传输信道的特征(例如,一根电线或一根天线);
- 无线发射机,在无线遥测中,由复合信号来调制;
- 阻抗线适配器,在有线传输条件下,根据连接到适配器上的电路的输出阻抗来调整线的特性阻抗;
- 发射天线。

接收端的组成模块相似。对于无线遥测,这些模块是

- 接收天线,设计依照最大化 RF 带宽利用率;
- 无线接收机,要求具有对各种调制方式兼容的解调器;
- 解调电路,用于各个传输信道。

遥测系统的传输,特别是无线遥测系统,是通过发送一个特定的信号来实现的。该信号在幅度、频率或相位上的模拟变量是传感器或变换器输出信号的已知函数。数字遥测系统将以有限符号集合的方式来发送数据,每一个符号代表信号抽样时刻该信号的一个可能的有限值。

在无线通信系统中,有效通信距离是受发射机天线辐射功率、接收机灵敏度和 RF 信号带宽限制的。随着带宽的增加,噪声对于总传输信号的影响也随之增加,从而需要更大的发射功率来保持相同的信噪比。这是无线遥测系统的主要限制条件之一。在一些应用中,接收机传输是利用基带信号来完成的,它位于调整电路的后部分。基带遥测系统的优势在于它的简单性,基带传输通常是限制在一

个信道上。

几乎所有的数字元器件都可以通过遥测链路整合为元器件网络。遥测广泛用于空间应用中的远距离测量和传动装置控制。在大多数应用场景中,例如在空间遥测中,设计一个具有最小功率消耗的系统是很重要的。交通系统中的一些汽车和火车采用无线遥测来进行监视和控制。在临床医学中,随着病人不再需要固定的监控系统,对病人使用遥测提高了他们的生活质量和移动性。不少医学应用是基于将传感器植入病人,并且传输数据用于进一步的分析和诊断。

多信道遥测用于测量多个应用场景中不同的进程和物理变量。在这些多重测量中,不能使用基带遥测,因为它将需要对各个信道建造不同的系统。多信道遥测可以通过共享公共资源(传输信道)来实现,如图 1-23 所示。多个测量信道对传输信道的共享可以通过复用来实现。

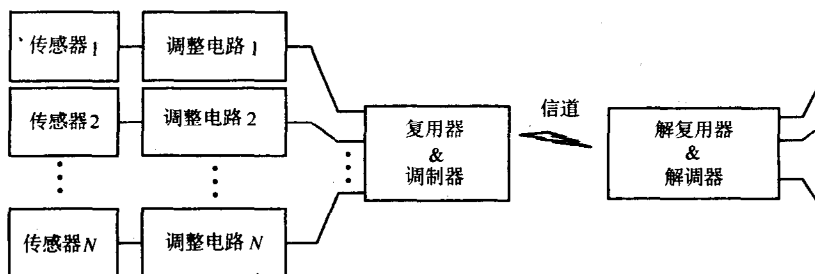



图 1-23 多路遥测系统框图

遥测主要使用两种基本的复用技术:FDMA 和 TDMA。在 FDMA 中,不同的子载波频率由不同的测量信道信号进行调制,从而将信息频谱从基带移至不同的子载波频率。然后子载波频率调制成 RF 载波信号,这使得所有需要的测量信道可以同时传输。在 TDMA 中,整条信道都被分给多条测量信道,尽管这些信道可能只在一个时间段处于激活状态。TDMA 技术使用数字调制技术在不同的时间抽样不同的测量信道。

术语 SCADA 已经被过程控制工业采用,来描述通过遥测技术整合在一起用于检测和控制一系列计算机、传感器和其他设备。SCADA 系统的使用不受限制,因为它们只受设计者想象力的限制。这些系统用于监测高压电力分布线和分布站的状态,广播站的 RF 能量传送,蓄水库的水平面等。随着数字系统变得越来越精密,远程遥测和控制系统的使用在资源的管理上变得更加重要。

使用 SCADA 系统的好处之一是在现有的应用场景中已存的传感器可以很容易地整合到整个系统中,从而降低了向新技术过渡的成本开销。在此过程中,SCADA 系统增加了新协议层的特征,同时为现有系统提供了额外的性能。更进一步来说,系统控制可以从不同的远程地点转移到到集中式的单一地点。

## 1.7 噪声和失真

噪声在通信系统中是一个非常严重的问题。噪声可以定义为由自然界以及由于其他系统或者用户干扰产生的随机性的、不可预测的内部和外部电子噪声信号。内部噪声由热能产生,或由设备内部电子设备的电子运动产生等。外部噪声可以由诸如雷暴和太阳运动的大气效应引起。干扰是人造源产生的噪声,例如其他通信系统的发射机、电力线和机械设备等导致的。

### 1.7.1 电子系统中的内部噪声

噪声在所有的电子设备中都是一个重要的概念。噪声是不希望存在的信号,它在内部由设备自身产生,在外部由其他信号强加给它。噪声可以是电路固有的,或者可以是从电路外部引入的干扰。固有噪声和干扰噪声有许多不同的类型。取决于设备的不同,有一些噪声的影响非常大,然而其他的一些噪声则可能微不足道。噪声是所有设备关心的话题,这里将对噪声做了一个概要性的介绍,包括描述热噪声、散粒噪声、额外噪声、突发噪声、分布噪声、复合噪声和点噪声等。

热噪声,也就是 Johnson 噪声,是由晶格中载流子在热平衡条件下随机碰撞产生的。热噪声可以通过一个串联电压源 $v_t$ 或并联电流源 $i_t$ 以方均值的形式来建模:

$$\overline{v_t^2} = 4kTR\Delta f \text{ 和 } \overline{i_t^2} = \frac{4kT\Delta f}{R} \tag{1-7}$$

式中,$T$ 为温度(K);$R$ 为电阻(Ω);$\Delta f$ 为测量噪声的带宽(Hz)。$\overline{v_t^2}$ 的公式被称作奈奎斯特(Nyquist)公式。该热噪声幅度的概率分布可以通过高斯(Gaussian)概率密度函数来建模。

散粒噪声是由电子的随机发射和载流子随机通过势垒产生的。设备中的散粒噪声可以通过一个并联噪声电流源来建模。在频率为 $\Delta f$ 的带宽中,散粒噪声电流的方均值为

$$\overline{i_{sh}^2} = 2qI\Delta f \tag{1-8}$$

式中,$I$ 为通过设备的直流电流;$q$ 为电子电荷。该公式通常被称为肖特基(Schottky)公式。和热噪声类似,散粒噪声是一种服从均匀高斯分布的白噪声。

额外噪声是由阻抗材料中分子间的可变接触引起的。通常认为由碳组成的电阻产生了大多数超噪声,而金属膜电阻产生最少。超噪声电流的方均值为

$$\overline{i_{ex}^2} = \frac{10^{N_I/10}}{10^{12}\ln 10} \times \frac{I^2\Delta f}{f} \tag{1-9}$$

式中，$I$ 为通过电阻的直流电流；$N_I$ 为噪声指数。

突发噪声，也就是爆米花噪声，是由 PN 结中的金属杂质引起的。当用扬声器放大和重生该噪声时，它听起来就像爆米花的声音。在示波器上，它显示为一种幅度固定而宽度和重复速率随机变化的脉冲。该速率可以从每秒一个脉冲变化到每秒数百个脉冲。

分割噪声是在电流中载流子有可能分为两条或多条路径时产生的。该噪声会在分割统计过程的电流单元中产生。具体来说，分割噪声会在双极性晶体管(BJT)中产生，因为在该晶体管中，从发射极进入基极的电流有一条或两条路径。

产生—复合噪声产生于半导体中，它是由于产生、复合和过滤率自发波动引起的随机波动或自由载流子密度造成的。该噪声出现于双极性晶体管和场效应晶体管(FET)中，不存在于 MOS 场效应晶体管(MOSFET)中。

点噪声定义为某带宽上噪声的方均根值除以噪声带宽的开方。对于噪声电压和噪声电流来说，单位分别是 $V\sqrt{Hz}$和 $A\sqrt{Hz}$。对于白噪声，点噪声在任何带宽上都等于频谱密度的二次方根。一个设备输出的点噪声电压是 $\sqrt{\overline{v_{no}^2}/B_n}$。通常噪声带宽是根据一个二阶带通滤波器来表示的，表达式为 $B_n = \pi B_3/2$，其中 $B_3$ 是指 $-3$dB 时的系统带宽。如果带通滤波器有两个极点分别在频率 $f_1$ 和 $f_2$ 上，那么噪声带宽为 $B_n = \pi\ (f_1 + f_2)\ /2$。

总噪声是噪声电流和噪声电压的总和。在总噪声中，瞬时电压（$v = v_n + i_n R$，其中 $v_n$ 为噪声电压，$i_n$ 为噪声电流）起着很重要的作用。总噪声电压的方均值可以表示为

$$\overline{v^2} = \overline{(v_n + i_n R)^2} = \overline{v_n^2} + 2\rho\sqrt{\overline{v_n^2}}\ \sqrt{\overline{i_n^2}}R + \overline{i_n^2}R^2 \tag{1-10}$$

式中，$\rho$ 为相关系数，其具体定义为

$$\rho = \frac{\overline{v_n i_n}}{\sqrt{\overline{v_n^2}}\sqrt{\overline{i_n^2}}} \tag{1-11}$$

对于 $\rho = 0$ 的情况，产生噪声的源被称为不相关的或独立的。

在许多电路分析中，噪声信号是以复数虚部的形式用相位来表示的。同时，电子设备，例如放大器产生的噪声可以将所有的内部噪声源加至输入端来建模。

噪声带宽是具有恒定带通增益的设备带宽，当输入信号为白噪声时，它允许具有相同的方均根值的噪声电压通过。白噪声对于给定的频率范围具有相同的幅度，噪声带宽为

$$B_n = \frac{1}{A_{vo}^2}\int_0^{\infty} |A_v(f)|^2 \mathrm{d}f \tag{1-12}$$

式中，$A_{vo}$为 $|A_v(f)|$ 的最大值。对于频谱密度为 $S_v(f)$ 的白噪声输入电压，滤波

器输出的方均值噪声电压为$\overline{v_{no}^2}=A_{vo}^2S_v(f)B_n$。

噪声带宽可以用已知电压频谱密度的白噪声源来测量。如果该噪声源的频谱密度未知，那么噪声带宽就可以通过比较它和已知噪声带宽的另一个源来决定。未知源的噪声带宽可以表示为

$$B_{n2}=B_{n1}\frac{\overline{v_{o2}^2}}{\overline{v_{o1}^2}}\left(\frac{A_{vo1}}{A_{vo2}}\right)^2 \tag{1-13}$$

白噪声源必须具备低的输出阻抗，使得负载效应不会改变源的频谱密度。

噪声信号的频谱密度可以定义为单位带宽上噪声的方均值。例如，对于电阻产生的热噪声，电压频谱密度可以表示为

$$S_v(f)=4kTR \tag{1-14}$$

正如式（1-14）所示，因为频谱密度是独立于频率的，所以热噪声可以认为具有扁平的或均匀的分布，并且称为白噪声。

### 1.7.2 干扰

噪声可以通过外部源传输给电子电路。传输噪声有很多种分类，分类依据取决于它是如何影响输出信号以及如何进入电子电路的。传输噪声可以是磁性的、电容性的或电磁性的。对于输出信号来说，干扰噪声可以是加性的或乘性的。

加性噪声的噪声幅度与有用信号的幅度独立。对于加性噪声来说，如果设备没有信号，那么只能观察到噪声。加性噪声可以表示为

$$v_{out}=v_{signal}+v_{noise} \tag{1-15}$$

对于乘性噪声，信号是和传输噪声一起进行调制的，它随着信号幅度的变化而变化。乘性噪声可以表示为

$$v_{out}=v_{signal}+v_{signal}\times v_{noise} \tag{1-16}$$

传输噪声可以是周期的或随机的，这取决于它产生的地点和方式。磁感应可以是感性的；同时静电感应或电荷又可以是容性的；在高频时，传输噪声可以是电磁性的，或者也可以是以上三种形式的组合。

主要的外部噪声可以通过设备进行噪声检测来识别。例如，50/60Hz 电源通常可以产生 100pA 噪声信号，然而 120/100Hz 电源可以产生几微瓦噪声，无线广播台可以产生高达 1.0 mV 噪声。机械振荡可以产生 10～100pA 噪声电流。

### 1.7.3 通信系统中的噪声和失真

在所有类型的通信系统中，噪声和失真都是常见的问题。通信系统中的噪声来自诸如热扰乱、RF 干扰、串话和游动开关接触等因素。在通信系统中，信道输出中所有不是由输入信号引起的信号，即无关信号都认为是噪声。

在许多 RF 应用中，噪声都可以看作是高斯变化的，但需要注意的是这只是一种近似。噪声如果是随机的，并且是许多噪声彼此重叠组成的，那么也认为是高斯性的。高斯噪声的概率密度函数是大家熟悉的正态分布。

在无线通信系统中，接收到的信号大体上必须大于 RF 噪声。存在许多噪声源（见图 1-24），包括内部噪声（由接收机和支持接收机的电子元器件产生）和外部噪声（人造或自然产生的）。人们认为在低频部分，也就是低于 30 MHz 时，由天线接收到人造或自然产生的外部噪声大于内部噪声。在大于 30 MHz 的频率部分，内部噪声通常大于天线接收到的外部噪声。如果不被滤波，那么噪声就会有很宽的频率分量。

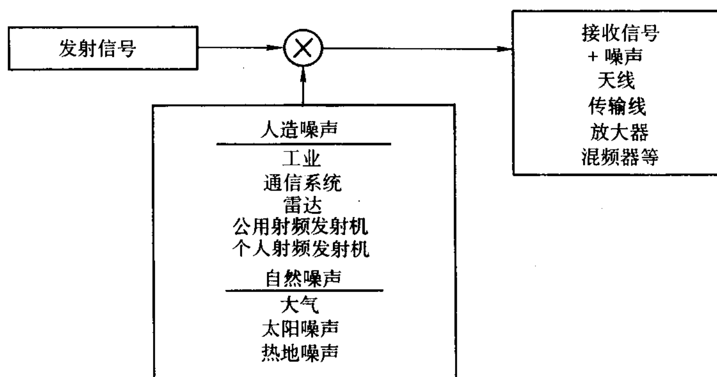



图 1-24　通信系统中的自然和人造噪声源

噪声功率可以表示为

$$P_n = kTB \tag{1-17}$$

式中，$P_n$ 为有效噪声功率（W）；$T$ 为噪声温度（K）；$k$ 为玻尔兹曼（Boltzmann）常数（$1.38 \times 10^{23}$）；$B$ 为有效的接收机噪声带宽（Hz）。

人造噪声主要是由电动机、氖和荧光灯、电力线、点火系统、家用电器、工业设备和电器、工作于目标电子设备周围的电子系统等产生。此外，其他通信系统也可能产生很多噪声。干扰包括自身频率上接收到的其他信号、与这些频率相关的谐波和分谐波。通常人造噪声随着频率的增加而降低，如下式所示：

$$T_a = 100 \times T_a / f_{MHz} \tag{1-18}$$

式中，$T_{100}$ 为人造噪声在 100MHz 频率处的噪声温度。

为了确定某一特定地点的人造噪声，需要使用专门的设备来进行人造噪声测量。测量结果可能因时间、季节、设备方向和测量时刻邻近噪声密度的不同而不同。

通信系统的链路信噪比取决于该链路使用的调制方式和应用场景。在模拟通信系统中，可以忍受的噪声水平较高，从而有较高的信噪比。数字系统不能

忍受太高的噪声，但是由于数字处理技术的使用可以从接收信号中更好地提取信息。总之，信噪比可以通过使用高质量的组成单元、专门特殊的设计和适当的信号处理技术来得到提高。

### 1.7.4 数字系统中的噪声

数字系统的大部分噪声是由系统自身产生的。主要的噪声源包括电源噪声、信号回路耦合、串话、符号间干扰和参数偏移等。低水平的噪声源包括 α 粒子、热噪声、散粒噪声。另外，如上所述，闪烁噪声也会存在。此外，数字系统由于自身的运行特点也施加了额外的噪声。数字系统产生的一些重要的噪声是量化噪声和相位抖动噪声。数字操作产生的噪声需要在 RF 通信系统的设计和实现中加以关注，因为它可以在数据传输过程中引起严重的错误。

量化噪声是原信号与它的等价量化值之间存在差异的结果，在 1.3 节进行了专门介绍。

相位抖动噪声是由于信号通过通信网络时载波相位抖动引起的。信号相位的抖动引起了接收信号的过零拖尾效应。这样造成的后果是，严重的抖动可能造成时隙内脉冲向邻近脉冲移动。

## 1.8 小结

本章给出了测量、元器件、传感器和通信的背景知识，对元器件和传感器的核心部件做了详细描述。传感器产生的信号必须认真处理，从中提取和传输有用信息。引入无线元器件通信，并且讨论了它在工业环境中的应用。同时，本章还给出了噪声、干扰和失真对通信系统的影响。

# 第2章 无线通信

通信是将信息从一个设备传送到另一个设备。现代通信系统可以将人工信号传输到不同地方。携带信息的通信信号形式可以是电能（如电流和电压）、电磁能、光能或声能。这些信号由电子产生，通过电缆和有线的形式传输，或在空中以无线电波或微波的方式进行无线传输。信号也可以通过光或声音的方式传输。

设备之间的通信可以通过从信源到信宿的电子信号传输来实现。信息的发出者称为信源，接收者称为信宿。信源将原始消息（例如，语音、文本）转换成电信号传输给信宿。信源也对不同媒质产生相应的电信号，这些媒质包括有线、无线、光波等。由各种硬件和软件组成的信源称为发射机。发射机的任务是将通信信号转换成适合信道传输的形式以使传输成功。通信信道是指连接发射机和接收机的媒介。该媒介可以是电线、同轴电缆、光缆或载有电磁波或光波的无线空间。在接收端，接收机提取信道中的信号，并对其进行处理，使其中的信息可以被解释和理解。接收端将接收到的电信号转换为原始信息的形式，例如语音、文本或数据。

本章着重阐述了采用电磁波，特别是处在广播频段的电磁波的无线通信技术的基本原理。无线通信技术在工业以及消费产品中得到了广泛的应用。

本章首先介绍电磁波传播的基本原理；接着讨论了电磁波辐射、损耗、衰落、反射、折射和衰减的重要因素；对成功进行RF通信的必要元件也作了详细介绍。最后对与无线传感器和设备相关的现代通信方式，如调制和复用技术，频率扩展和多址接入等，进行了详细阐述。

## 2.1 无线通信原理

在无线通信系统中，信息通过信道从信源传输到信宿，如图2-1所示。信息以消息为载体。消息不仅包括信息的所有有用特征，还包括其他部分，例如加密和协议。消息可以有多种形式，采用的形式只需令信源和信宿彼此理解即可。在元器件系统中，多数消息都是采用连续时变的形式，诸如过程温度、容器压力、汽车加速度或各种医学变量。

无线通信采用在自由空间或各种媒质中传播的电磁波进行传输。电磁波是由天线产生的，它将电能转换成电磁波能量。接收天线提取电磁波能量，并且

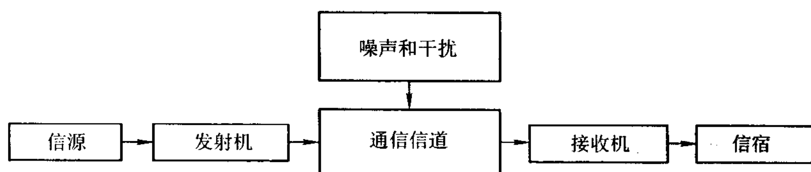



图 2-1 简单的通信系统框图

把它转换为电信号。发射和接收的能量通常是以分贝的形式表示。

**分贝**

分贝（dB）是一个通信系统输出和输入功率之比的度量。它是一个相对量，并不表示某个时刻或某个空间的绝对信号大小。分贝定义为

$$10\lg\frac{P_{out}}{P_{in}}\text{dB} \tag{2-1}$$

举个例子，一个放大器输入 2mW，输出为 5mW：

$$10\lg\frac{P_{out}}{P_{in}}=10\lg\frac{5\text{mW}}{2\text{mW}}\approx 4\text{dB} \tag{2-2}$$

类似地，如果输入为 10mW，而输出为 100mW，那么功率比为 10，即为 10dB。输出输入比为 100，则为 20dB；输出输入比为 1000，则为 30dB，以此类推。

如果输出功率小于输入功率，那么电路增益为负分贝。若输出为 1mW，而输入为 2mW，则输出输入比为 0.5，即为 -3dB。输出输入比为 0.1，即为 -10dB;输出输入比为 0.01，即为 -20dB，以此类推。

0dB 有多种含义：0dBj = 1mV，0dBk = 1kW，0dBm = 600Ω 电阻上的 1mW，0dBv = 1V，以此类推。举一些通信工程中最常见的分贝例子，与 1mW 对应的分贝是 dBm；因此，1mW 输入，1mW 输出就表示 0dBm。在 dBm 中，输入被理解为 1mW，因此 dBm 表示与输入 1mW 的相对值。根据这种定义，输出为 $10^2$mW，即为 20dBm；类似地，输出为 300mW，即为 24dBm。在这两种情况下，输入功率都认为是 1mW。在实际操作中，如果输入功率不为 1mW，那么输出功率就按比例调整，从而使得 dBm 的值保持不变。

类似地，与 1W 对应的分贝是 dBW，因此 1W 的输出是 0dBW。1mW 的输出是 -30dBW，而 20W 的输出就是 13dBW。

用分贝表示的电流和电压略有不同。假设输入和输出的电阻相同，那么采用分贝的定义就可以得到

$$10\lg\frac{P_{out}}{P_{in}}=10\lg\frac{(E_{out})^2_R}{(E_{in})^2_R}=20\lg\frac{E_{out}}{E_{in}} \tag{2-3}$$

在比例工程中，电路通常以 dBmV 或 dBuV 来量化。如果是 dBuV，那么分

贝就是以 1μV 作为信号参考电平。因此，20dBuV 的信号电平实际上就是 10μV；类似地，0.5μV 就是 3dBuV。类似的结果也适用于 dBmV。

## 2.2 电磁波传播

在无线电和微波通信系统中，天线将电路产生的电能转换成辐射的电磁能。电磁能以正交的电磁（TEM）波的形式在媒质中传播。电磁波在同一时刻有彼此正交的电场（$E$）和磁场（$H$），并且电场和磁场方向都与传播方向正交。电场强度 $E$ 是以伏特每米（V/m）的形式表示，磁场强度是以安培每米（A/m）的形式表示。TEM 波的传播如图 2-2 所示。

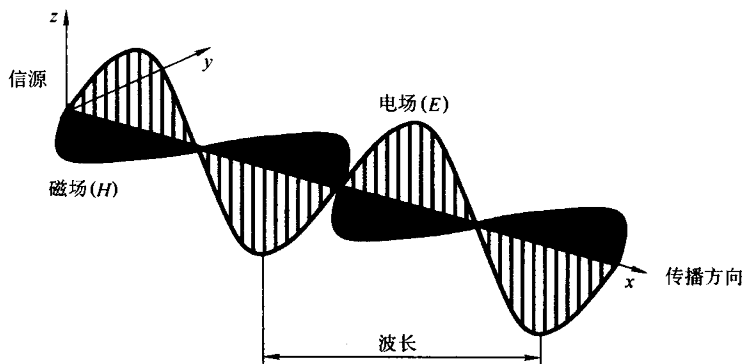



图 2-2 电磁波的传播

波长是电磁波在一个周期内经过的距离。一个周期内波传播的距离取决于波在媒质中的速度。在自由空间中，RF 电磁波的速度等于光速（大约为 $3\times10^8$ m/s），这样波长就可以由下式计算：

$$\lambda = c/f \tag{2-4}$$

式中，$\lambda$ 为波长（m）；$c$ 为光速；$f$ 为频率（Hz）。

电磁波的基本属性有波长、频率、强度或功率密度以及极化方向。波长是电磁波在一个完整周期内传播的距离。频率是每秒内传播的周期数。强度是电磁波的电场强度，以单位距离上的伏特数（V/m）来表示。电磁波的功率密度表示电磁波携带的能量，单位是瓦特每平方米（W/m$^2$）。许多工程师以功率密度来计算设备和系统的性能。极化方向是指电场在自由空间中传播的方向。如果极化方向相对于地球表面是水平的，那么就称该电磁波是水平极化的。其他的极化方式也是可能的，例如椭圆极化或圆极化。这些电磁波的极化方式决定了旋转电场矢量（$E$ 矢量）。举个例子，圆极化波就是两个具有正交极化方式的线性极化波随时间变化的合成量。在这类情况下，随着电磁波在空间中传播，

极化矢量向左或右旋转。而该旋转方向取决于这两个线性极化分量间相移是 +90°还是 -90°。

### 2.2.1 自由空间传播的功率和链路分析

TEM 波在自由空间某一点处的功率密度是由两个物理量来决定的，即电场和特性阻抗：

$$P_1 = E^2/Z_0 \tag{2-5}$$

式中，$P_1$ 为功率密度（$W/m^2$）；$E$ 为电场强度（V/m）；$Z_0$ 为特性阻抗，在自由空间中等于 377Ω。

在自由空间中，电场强度和磁场强度都与远离发射机的距离成反比。功率强度与距离的二次方成反比。例如，如果点 X 距离发射机的距离是点 γ 的 3 倍，那么点 X 处的电场强度则是点 γ 处的三分之一，而点 X 处的功率密度则是点 γ 处的九分之一。在现代无线通信系统中，这一点非常重要，因为传向接收机的功率随距离的二次方减少，所以这就限制了信号的有效传播距离。

自由空间传播模型适用于在发射机和接收机之间为视距的情况下对接收信号强度的预测。天线接收到信号后，将自身的天线增益叠加在接收信号上。发射天线功率经自由空间距离 $d$ 辐射后的功率，可以由 Friis 自由空间公式得到

$$P_r(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \tag{2-6}$$

式中，$P_T$ 为发射功率；$P_r(d)$ 为接收功率；$G_T$ 为发射天线增益；$G_R$ 为接收天线增益；$d$ 为发射机和接收机之间的距离；$L$ 为与传播无关的衰减因子（≥1）；$\lambda$ 为波长（m）。衰减因子 $L$ 由不同部分组成，包括传输线衰减、滤波器衰减、天线衰减等。

Friis 自由空间模型适用于距离 $d$ 有限，发射天线引起远场电磁波的情况。超过远场距离的范围，$d_f$ 就可能与发射机天线孔径的最大线性尺寸和载波波长有关，它可以由下式表示：

$$d_f = 2D^2/\lambda \tag{2-7}$$

式中，$D$ 为天线的最大物理尺寸。

通信系统链路分析可以通过包含信号噪声比的一系列计算得到。接收端的噪声功率计算公式为

$$N = kT_0 B F_n \tag{2-8}$$

式中，$kT_0$ 为参考噪声水平（$=4\times10^{-18}$ W/Hz）；$B$ 为接收机带宽（Hz）；$F_n$ 为接收机系统噪声因子。

从式（2-7）和式（2-8）可以计算出信噪比

$$S/N=\frac{P_{T}G_{T}G_{R}\lambda^{2}}{(4\pi)^{2}d^{2}LkT_{0}BF_{n}} \tag{2-9}$$

### 2.2.2 天线特性

天线产生电磁波并在自由空间中传播。如果源自天线的电磁波按各个方向均匀辐射，那么该天线就称作全向天线。在现实中，理想的在各个方向上均匀传播电磁波的全向天线是不存在的。在决定实际天线特性时，常常使用全向天线作为参考。举个例子，某个方向上天线的增益就是该方向上实际测量到的功率和对应的全向天线的功率的比值。

如果天线作为接收天线和发射天线的增益都相同，那么该天线就称作是双边（对称）的。作为接收天线时，有效接收面积（也称作有效孔径）可以表示为

$$A_{f}=\frac{G_{R}\lambda^{2}}{4\pi} \tag{2-10}$$

式中，$A_f$ 为天线的有效孔径；$\lambda$ 为波长；$G_R$ 为接收天线增益。该公式说明天线的有效孔径 $A_f$ 取决于天线的物理尺寸。

### 2.2.3 近场、远场和衰落

有源传播的电磁波采用两种形式进行传播：近场传播和远场传播。近场传播存在于距离源小于六分之一波长范围内。近场也是电场和磁场。在这个范围内，传播的电磁波取决于源的特性和产生电磁波的电路阻抗。在近场中，反应能起主导作用。反应能可以被分离成电场和磁场，并将它们作为两个独立的部分来处理。

远场是在电磁波传播距离源大于六分之一波长的范围内发生。一旦远场出现，电磁波的传播就与源的特性无关。远场传播认为波的阻抗不变，不考虑它传播的空间和地点。该阻抗定义为电场强度和磁场强度的比值，在自由空间中取值为 377Ω，它基本上表示了电压和电流之比。

既然电磁传播表现出了不同特性，那么电磁波的测量技术就有所不同。在近场范围，必须分别测量电场和磁场。在远场范围内，通常只测量电场。远场强度可以通过测量功率密度（$W/m^2$）来得到。功率密度定义为在与源垂直方向上，每一平方米上通过的辐射能量。峰值功率密度为 $E\times H$，对于正弦源，平均的能量密度是这个值的二分之一，而且各个频率分量都必须是相互独立的。总的平均功率是所有频率的平均功率之和。总的平均功率（单位为 W）为 $P=E^2/377$。

在场强和无线通信信号强度的测量过程中，场强随着最小范围长度即二分

之一波长进行大范围变化。在此范围的近场区域，场强对于电磁波的频率和传播路径上的物体非常敏感。这些变化取决于时间以及这些物体的形状和位置，例如邻近处人们的移动。由于移动接收机的使用，故可以方便地监测到快速的近场空间变化（也称作快衰）。当电磁波离开天线传播时，强度的变化可以用多径的存在来解释。大于二分之一波长距离上的场强变化，一般只与频率有关，这种变化称为慢衰。

### 2.2.4 电场矢量叠加

电场是可以用方向、幅度和相位来描述的矢量，因此在数学上将其看作标准矢量。由于多种原因，两个或多个电场可以以矢量的形式相加或相减。例如，来自相位阵天线中独立元素的电场需要作为矢量来处理，从而得到合成的矢量。同样，如果传播的电磁波发生反射，将原来电磁波与反射电磁波的矢量进行加减对于决定总的空间场强是非常必要的。传播电磁波的空间场强取决于诸如反射强度以及传播波与反射波之间的相位差等因素。

### 2.2.5 自由空间路径损耗

路径损耗（也就是自由空间损耗）指的是当增益为1时，发射天线和接收天线之间辐射信号的传播损耗。路径损耗表示的信号衰减值为正值，并以分贝的形式表示。路径损耗可以表示为

$$P_L=\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2d^2} \tag{2-11}$$

式中，$P_L$ 为标量形式的自由空间路径损耗；$d$ 为距离（m）；$\lambda$ 为波长（m）。

如果考虑到天线增益，路径损耗就可以表示为

$$P_L=\frac{G_TG_R\lambda^2}{(4\pi)^2d^2} \tag{2-12}$$

自由空间路径损耗随着频率的增加而增加，这是因为随着距离的增加天线的接收面积减小。路径损耗随着距离的增加而急剧增加，这是因为接收功率与传播距离的二次方成反比。

### 2.2.6 额外路径损耗和大气衰减

在自由空间传播的电磁波会受到各种衰减影响，包括衍射、电离层折射和散射传播损耗。这些损耗总称为额外路径损耗。

在卫星和空间探险中，当电磁波穿过大气时，会由于大气吸收而衰减。而在较低的频率，附加的大气衰减很小，因此传播损耗与自由空间传播损耗接近。但在较高的频率，比如10 GHz或更高时，大气吸收会变得非常严重。除了一般

的大气损耗，诸如雨、雪和大雾也将引起衰减。这些额外的衰减在 1.3 GHz 或更高的频率上相当严重。

### 2.2.7 电磁波的反射

电磁波会受到地球表面和其他物体的反射。反射的电磁波将干扰原来的电磁波。如果干扰是有利的，那么反射的电磁波与原来的电磁波相加，从而在接收天线处产生更强的电磁波。如果反射的电磁波是有害的，那么它会使接收电磁波比原始直射电磁波更弱。干扰是有利还是有害，取决于两个相互作用的信号的相对相位角。反射信号和直射信号的矢量相加称为多径。通常多径是不希望出现的现象，但是在某些情况下也能够被很好地利用，如在一些室内的无线通信系统中。

多径在通信系统中非常重要。举例来说，在蜂窝移动通信系统中，由于发射机和接收机之间存在多条传输路径，所以多径是传播中需特别注意的问题。期望从发射机到接收机的传输路径仅为直射路径，但是也会接收地面和其他阻挡物反射的信号。在蜂窝移动通信系统中，当反射信号叠加起来大于直射信号时，会改善接收质量。

### 2.2.8 大气折射

大气对电磁波传播的一个重要影响是折射。大气的密度不是固定的，而且其化学成分和电离作用是随海拔变化的。这就意味着电磁波穿过大气的传播速度将会发生改变。最终的效果是发射的电磁波不是以直线传播而是沿弧线传播，即电磁波在穿过不同条件的大气时会些微改变其速度。

### 2.2.9 电磁波的衍射

衍射是指传输路径上不同的物质造成电磁波传输路径弯曲。大的物体如大楼、房屋、仓库和树木都能在开阔地区产生衍射（见图 2-3）。

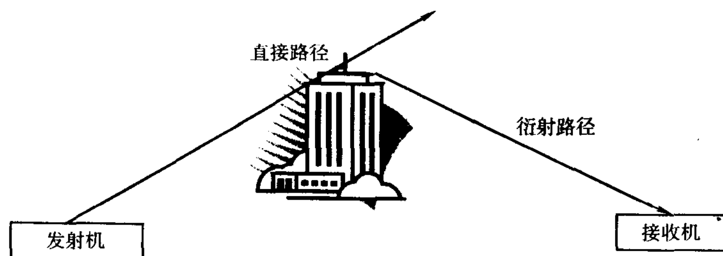



图 2-3 电磁波的衍射

诸如机器、柱状物、墙和其他结构体的物体会在设备车间和办公室等封闭

空间中产生衍射。不论是在开放空间还是在封闭空间，衍射现象都可以被有效利用，是由于在发射机到接收机之间为非视距传输情况下，接收机能够接收到发生衍射的一部分能量。虽然这一过程会有损耗，但是对于良好的接收机来说，信号强度已经足够了。

## 2.2.10 电磁波的室内传输

室内环境下，电磁波的属性对工厂和车间的无线通信设备和无线通信网络的影响非常重要。在室内环境中，固定基站发射的信号都要通过多径到达接收机，并且都伴随有微小的时延。接收到的电磁波可能会包含一个直线传输信号和被墙、柱状物等建筑物反射或散射的信号。

多径衰落会严重损害室内通信系统的性能，但是通过恰当地设计发射机和接收机以及精心地选择布站位置，能将这种影响降到最小。室内无线电通信中，详细描述信号传输的空间属性对成功运行这个系统是非常必要的。

## 2.2.11 频段分配

电磁辐射的性能会由于频段的不同而不同，因此可将不同频段的电磁波分为若干组，见表 2-1。一些频段广泛应用于通信领域，因此将对其做简要讨论。

**表 2-1 电磁辐射的频段**

| 频率 | 波长 | 频带 |
|---|---|---|
| 3 ~ 30kHz | $10^5 \sim 10^4$m | VLF（极低频） |
| 30 ~ 300kHz | $10^4 \sim 10^3$m | LF（低频） |
| 0.3 ~ 3MHz | $10^3 \sim 10^2$m | MF（中频） |
| 3 ~ 30MHz | $10^2 \sim 10$m | HF（高频） |
| 30 ~ 300MHz | 10 ~ 1m | VHF（甚高频） |
| 0.3 ~ 3GHz | 1 ~ 0.1m | UHF（特高频） |
| 3 ~ 30GHz | 10 ~ 1cm | SHF（超高频） |
| 30 ~ 300GHz | 1 ~ 0.1cm | EHF（极高频） |
| 0.3 ~ 3THz | 1 ~ 0.1mm | 频段 12 |
| 1 ~ 417THz | 300 ~ 0.72mm | 红外线 |
| 417 ~ 789THz | 0.72 ~ 0.38mm | 可见光 |
| 789 ~ $5 \times 10^6$THz | 0.38 ~ $6 \times 10^{-5}$mm | 紫外线 |
| $3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^8$THz | 100 ~ $1 \times 10^{-2}$Å | X 射线 |
| $> 3 \times 10^7$THz | < 0.1Å | γ 射线 |

极低频（VLF）和低频（LF）的波长很长，因此要求的天线尺寸也很大。

VLF和LF段的带宽很窄，限制了这些频段的应用。这些频段对通信系统来说不能得到有效利用，但是在海底和海域通信以及无线电导航系统中得到了广泛应用。

中频（MF）段用于包含中等距离的通信中。这个频段被广泛应用于商业无线电广播，海域和太空通信，以及导航系统。这个频段还同时允许业余无线电广播。

高频（HF）段被证明在长距离传输中具有良好的传播特性。这个频段被用于一些固定和移动服务。

甚高频（VHF）和特高频（UHF）段通常用于需要较大带宽的通信系统中。它们常用小角度天线发射和接收，因此更有效地利用了频谱。VHF和UHF段用于固定通信服务中，如地对空通信、电视广播和一些移动服务。这些频段在直线传播系统上的利用率较高。

超高频（SHF）和极高频（EHF）具有非常短的波长，因此需用小尺寸天线。在这些频段，通信传输距离较近，长距离传输需要一系列转发器和中继站。这些频段用于电视广播和高速数据传输中。

频率高于EHF的频段，通常要配合光纤才能用于通信。红外线频段用于无线局域网中。

全世界的不同通信服务的频段分配是由国际电信联盟（ITU）来确定的。区域2（北美和南美）的分配方案已被美国联邦通信委员会（FCC）采用。FCC负责全美射频频段的管理。个人频段的分配必须遵循：在申请频段传输信号之前，用户必须向FCC提出申请并得到批准，必须遵守其他FCC的规定，如最大传输功率、带外谐波、寄生信号电平。

## 2.3 RF组成

现代电子通信大部分是基于数字系统的。图2-4为数字通信系统的一个典型发射机的主要功能和组成部分。图2-4很重要，因为本书中讨论的无线通信系统在构成和运行上都有类似的体系结构。

一个数字发射机（见图2-4）的各组成部分的功能如下：信号源将一个信号（例如，语音信号、某一设备测得的测量结果等）转化为电信号。原始信号中常常含有冗余，因此信源输出的信号要经过信源编码进行压缩。信源编码也会对信号进行波形变换，使其适用于通信系统的带宽传输。加密部分是将信号编码为一个较复杂的形式，以防止第三方或未授权的接收者拦截和翻译此信息。信道编码重新调整信号，这样可以避免信号在信道预知噪声和失真的情况下产生错误。一旦发射机的信道编码的特征信息被接收机获得，它就可以纠正在传输

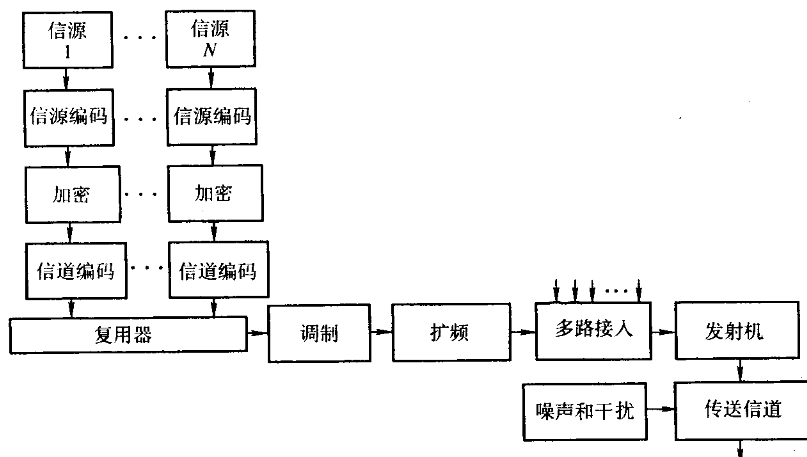



图 2-4　一个典型无线数字发射机的组成部分

过程中发生的错误。如果有多个传输信号，复用器被用来将信号叠加起来在同一信道上传输。复用器提高了频谱利用率，因为信道带宽通常情况下都会比任何一个传输信号的带宽大。复用信号接着被调制和扩频。扩频有许多优势，例如传输信号的签名会减少，从而降低了拦截和翻译此信息的概率。扩频之后，由于和其他用户共享信道，允许多址接入。一旦信号被调制，它们就为信道传输做好了准备。

接收机的一些功能模块是通过频率解扩、解调和解复用，把发射机发出信号中的原有信息提取出来。一个典型接收机的主要功能和组成部分如图 2-5 所示。

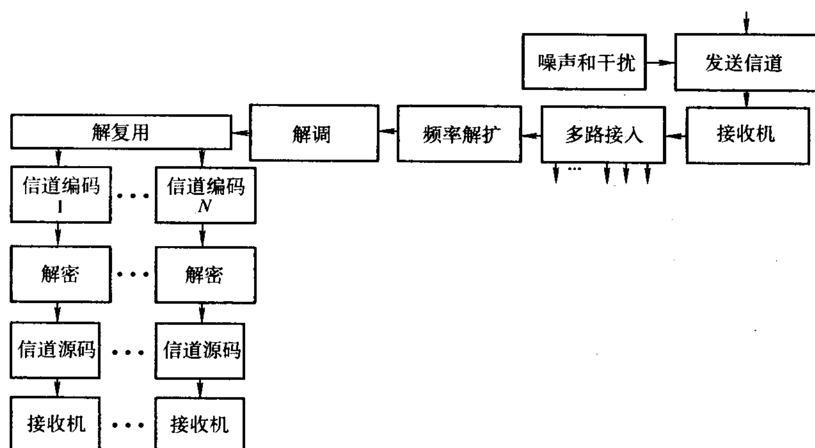



图 2-5　一个典型的无线数字接收机的组成部分

各组成部分之间电阻的匹配是很重要的，因为如果一个电阻对此系统不匹配，就会将原来用于传输的能量反射给发射源，造成驻波。反射回来的能量大小是由信号频率和不匹配程度决定的。驻波是以电压驻波比（VSWR）来描述的。VSWR 的比值范围是从 1 到无穷大，主要用来描述一个设备中存在多少反射回来的能量。VSWR 取 1，表示所有能量都传输出去了，不存在反射；取比 1 大的值，表示反射后的能量增加。通信系统的结构体系和组成部分是明显不同的。但是，大多数 RF 通信系统的一些组成部分功能是相似或相同的，这些组成部分包括放大器、衰减器、滤波器、发生器、乘法器、混频器、调制器解调器、复用器和天线。现代通信系统中的重要组成部分包括鉴相器，移相器，延迟线，双工机和天线共用器，绝缘体和循环器，上变频器和下变频器，功率分配器和能量结合器，变压器，电磁干扰（EMI）和射频干扰（RFI）滤波器，增益控制器，收发机和无线调制解调器。一个典型的接收机系统的组成部分如图 2-6 所示。一些常用的器件将在无线设备和网络的设计和应用之后做出解释。

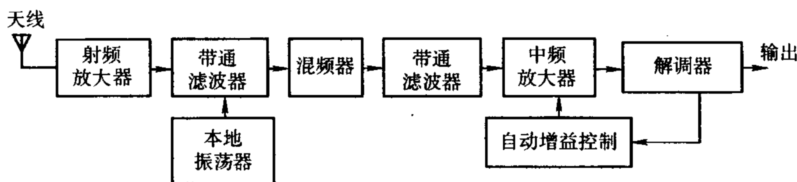



图 2-6 一个典型接收机系统

## 2.3.1 放大器

放大器是一个使输出信号相对输入信号有较大幅度增益的电子设备。一个理想放大器，除幅度有所增大外（增大的比例称为增益），其输出信号在波形和频率上都应与输入信号相似。在射频工程中，需要设计和使用许多不同的放大器。RF 放大器种类包括低噪放大器、功率放大器、脉冲放大器、双向放大器、多载波放大器、缓冲放大器和有限放大器。放大器的输入信号可以是电流、电压或其他类型的信号，输出信号常常与输入信号的类型相同。

RF 放大器包括 3 个主要特征：频率范围、增益和输出功率。电压放大器中，增益是信号输出电压与输入电压的比值。电流放大器中，增益是输出电流和输入电流的比值。相似地，在功率放大器中，功率增益是输出功率与输入功率的比值。通常增益都被表示为分贝值（例如，$G_{dB}=20\times\lg(V_o/V_i)$ 为电压增益，或者 $G_{dB}=10\times\lg(P_o/P_i)$ 为功率增益）。输出功率是由放大器的输出信号功率决定的，信号功率要在具体条件下确定，如温度、负载、VSWR 或提供的电压。输出功率的单位用 dBm、mW 或者 W 表示。

RF 放大器的电子特征包括运行电压、电流和电阻。其他性能的具体规范包

括噪声系数和输入 VSWR。噪声系数（单位为 dB）是输入信噪比与输出信噪比的比值。因此，噪声系数测量的是在通常情况下信号中增加的噪声大小。显然，噪声系数越小，说明性能越好。噪声系数设定了放大器动态范围的下限。

射频放大器是 RF 系统的主要组成部分，它们主要应用于以下部件：发射机 RF 放大器、接收机放大器、中频放大器（IF）、低频放大器（LF）、发射机输出功率放大器和缓冲放大器。

射频放大器在发射端和接收端均被使用，并且在射频系统中起重要作用。射频放大器用于所有无线电发射频段，包括 VHF 和更高频率的发射机和接收机。当设计和制作低噪声系数的 RF 放大器时，要特别注意的是要仔细选择所要使用的双极结型晶体管（BJT）以及关联的元件或者场效应晶体管（FET）。由于用途不同，放大器被设计制造成不同的类型，如 A 类、B 类、C 类、推挽式放大器等。

A 类放大器，如图 2-7 所示，通常用于小信号的低噪放大。它们有很好的线性属性、失真小、频带宽、良好的噪声系数、所有输出都具有较小的带通波纹、中等功率输出、稳定相位和增益，但是效率较低，会散失较多热量，而且放大器本身体积较大。

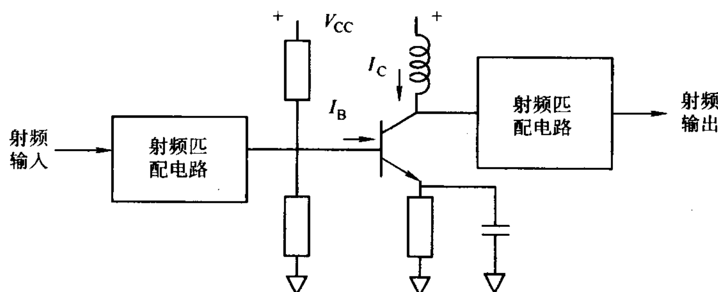



图 2-7 一个典型的 A 类 RF 放大器

B 类和 AB 类的放大器用于大型的或更高功率的放大。C 类放大器因为不具有线性特征，所以在某些情况下不适用。此外，在所有放大器设计中，电路的电阻匹配是非常重要的。在集中式电容感应电路也就是我们熟知的 *LC* 电路中，常常需要考虑电阻的匹配。在理想情况下，RF 放大器的输入信号通过放大器后只能在幅度上有所增大并不会改变频率成分和引入失真。但在实际中，由于晶体管的非线性运作和其他部件的原因，输出信号中会存在一些失真。

中频放大器用于为接收机电路提供所必需的增益。由于在 IF 频段制作窄带带通滤波器比较容易，所以中频放大器经常被使用。这些放大器还常常包括自动增益控制器（AGC）。

低频放大器常用于 RF 系统中，尤其主要用于发射机调制之后接收机解调之

前。在应用中，RC 或双变压 A 类放大器被用作低频放大器。在某些情况下，AB 类推挽式放大器也被用作低频放大器。

发射机输出功率放大器是将必需的功率传输给发射机的最主要的放大器。为防止超过一定传输频率下的最大功率水平的 FCC 极限，发射机输出功率放大器必须谨慎设计和选用。它们是 BJT 或 FET 晶体管化功率放大器，如单终结或推挽式放大器。在许多应用中，包括高功率发射，都使用多个放大器构成链状的级联放大器。链状放大器使用频率乘法器来达到要求的运行规格。

### 2.3.2 衰减器

衰减器是一种在理想情况下不改变频率、无失真或无反射地通过一系列电路减小信号发射功率的装置。输出信号的减小基本上与输入信号无关。用于无线电系统中的衰减器可以是固定的，也可以是可变的。一个固定衰减器的功率衰减的大小是事先确定的，但是设计时必须注意到输入和输出信号的特性。一个可变衰减器有一组特定的衰减范围，以适应不同的电路环境。

### 2.3.3 滤波器

滤波器是 RF 电路中非常重要的组成部件之一。在 RF 电路中使用的所有类型的滤波器包括低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器和阶式滤波器。低通滤波器允许低频部分通过，阻隔高频部分。高通滤波器允许高频部分通过，阻隔低频部分。带通滤波器允许所需频带内的信号通过。带阻滤波器阻隔特定范围内的频率部分，在此之外的频率部分能够通过。阶式滤波器是窄带带通或带阻滤波器。

RF 滤波器性能指标包括截止频率、带宽、纹波、插入损耗和 VSWR。对于低通滤波器，有一个特定的频率——截止频率，在此频率之上的频率部分全部被阻隔。高通滤波器的特定频率是开启频率，高于此频率的频率部分全部允许通过。对于带通和带阻滤波器，一个重要的特定的频率是位于带宽中心位置的中心频率。特定的高频和低频频点决定了带宽范围。纹波是通带响应的峰值到峰值的变化率。纹波通常表示为分贝值，是表征与系统设备匹配程度的一个性能指标。插入损耗是由于在传输设备线上插入一个设备所带来的总 RF 功率的传输损失。插入损耗是用插入设备输出信号与输入信号功率的比值来表示的。

### 2.3.4 振荡器

在通信系统中，产生不同频率的信号是发射机和接收机的一项重要功能。这些不同频率的信号是通过振荡电路使用适当器件产生的，如常用的晶体管反馈振荡器。这种类型的振荡器实际上是基本的晶体管放大器，但其同时伴随有

正反馈。这些振荡器的频率是由反馈电路中的谐振电路决定的。RF 系统中使用了多种振荡器：*LC* 振荡器、晶体振荡器、电介质共鸣振荡器（DRO），钇铁榴石（YIG）共鸣振荡器和陶瓷共鸣振荡器。这里只介绍其中的一小部分。

*LC* 振荡器频繁应用于 RF 通信系统中。*LC* 振荡器也分为许多类型，如常见的 Colpitts 振荡器、不使用晶体的稳频振荡器、调谐输入输出结型场效应晶体管（JFET）振荡器、微分对偶振荡器等。

石英晶体振荡器是 RF 系统中最常用的振荡器之一，它在保证频率稳定的同时还可提供高度准确性。若在其外部使用电容，则可调谐出精确的频率。

电介质谐振振荡器的原理是利用了电介质材料的高 *Q* 值属性，如谐振器。这种振荡器提供稳定的频率并体现出良好的相位噪声属性。YIG 谐振振荡器被应用于 UHF 和微波产品中。这些振荡器都是混频器和频率转换器的核心部分。

### 2.3.5 频率乘法器

频率乘法器是 RF 通信硬件的核心部分。乘法器产生的输出信号的频率高于事先确定的输入信号的频率。虽然频率乘法器不是线性组成单元，但是大部分的频率乘法器都可以消除输出信号中不希望出现的谐波，如同一个滤波器。频率乘法器分为两种类型：主动乘法器和被动乘法器。主动乘法器产生的输出信号的功率高于输入信号。输出信号和输入信号的功率（用 dB 表示）差值称为转化增益。转化增益表示为一个正值。一个被动乘法器的输出信号功率将小于输入信号功率。两者的差值称为转化损耗。它是一个负值，但一般用绝对值来表示。

频率乘法器可以通过二极管或晶体管来实现。基于晶体管的频率乘法器一般是由 C 类低功率晶体管构成的。C 类乘法器如图 2-8 所示。如图所示，该电路

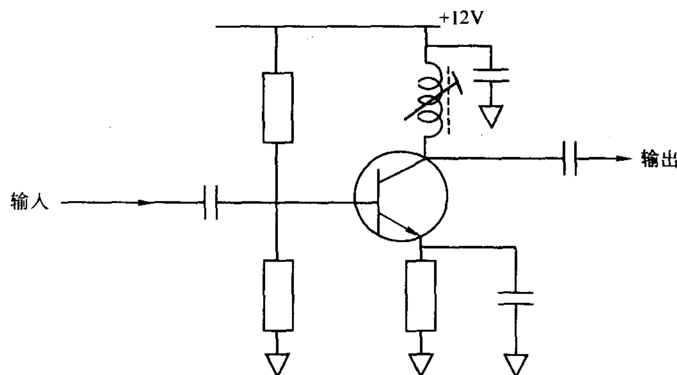



图 2-8 一个晶体管频率乘法器的基本电路

调谐于 $n \times f$，$f$ 为输入电压的频率，$n$ 一般取 2 或 3。也可以使用高倍乘法器，但是输出信号的幅度会很小。调谐电路可以由一个小型螺旋线圈和可变电容组成，也可以由插芯式调谐线圈和固定电容组成。

由于具有设计简单和效率高的特点，二极管乘法器也被广泛应用。两类常见的二极管乘法器是变容二极管和阶跃恢复二极管频率乘法器。

### 2.3.6 混频器

混频器有两个不同频率的信号输入端和两个输出端。它们的功能是将其中一个频率上的 RF 功率转移到另一个频率上。被转移的功率信号由 RF 输入端输入，而载波信号由 LO 端输入［通常情况下这个信号由本地振荡器（LO）产生，功率较低］。两者的频率以及频率差均由 IF 端输出。

混频器的基本性能属性包括 RF 范围、LO 频率范围、IF 范围、转化损耗和 LO 功率。RF 范围是指混频可以无差错处理的输入信号的频率范围。LO 频率范围是指本地振荡器的频率范围。IF 范围体现了混频器输出信号对接下来信号处理的适应性。例如，在超外差接收机中，接收到的信号会与一个 LO 信号一起经过一个混频器，而混频器输出两者的频率差或和信号，也就是接收到的 IF 信号。转化损耗定义为输入的 RF 信号与经过频率改变后的 IF 输出信号间的功率损耗。它可以由两者的功率比表示。转化损耗用来表示混频器的有效性。该损耗的测量可以通过观察一个具有固定 LO 信号功率的 50Ω 混频系统的输入输出特性得到。LO 功率是本地振荡器启动混频二极管所必需的功率，单位是 dBm。LO 功率是决定一个混频器动态范围的重要因素。

混频器可以有很多种应用：单平衡混频器、双平衡混频器、三平衡混频器、正交混频器和镜像抑制混频器。这些混频器大部分是由二极管组成的。同样在现代 RF 系统中也有很多不同种类的二极管混频器，例如单端二极管混频器、平衡二极管混频器、双端平衡二极管混频器和三端二极管混频器。发送混频器的组成部分中还包括 BJT 或 FET。发送混频器也有不同的种类，如单端混频器、平衡混频器和双端平衡混频器。发送混频器的一个重要优点是可以带来转化增益而不是转化损耗。FET 混频器所产生的互调失真比较小，因此可以应用于高频设备中。

在应用 RF 混频器时，隔离度是非常重要的。隔离度可以被定义为混频器某一输入端的信号功率与另一输入端产生的同频信号功率的比值。它是对混频器两个输入端内部电路是否平衡的一种评价。它表明信号进入混频器一个输入端后产生了衰减，而会对另一个输入端造成的影响。简单地说，如果隔离度很小，混频器输入端间的“泄漏”和“反馈”就会很小。

## 2.3.7　调制器和检测器

调制是通信系统中必要的处理过程。一个调制器将改变信号的各种属性，例如幅度、频率和相位，并且使载波信号适合发送。调制器可以针对发送信号的不同功率和频率而采用不同的技术。

可以采用模拟调制或数字调制。模拟调制是一种旧的但发展很完备的技术，被广泛应用于模拟通信系统。相比之下，数字调制是一种随着越来越多的数字通信系统的涌现而快速发展的新技术。在新技术不断出现的同时，某些技术在几年之后将逐渐成熟并得到广泛应用。

模拟调制表现为三种不同的形式：幅度调制（AM）、频率调制（FM）、相位调制（PM）。

幅度调制器通常用一个由电镀调制电路、网格调制电路或收集调制电路组成的 C 类放大器制成。也有许多其他类型的常规幅度调制器，包括 FET 门偏 AM 系统和 FET 推挽式调制器，同时还有针对各种边带的单边带调制器、双边带调制器和残余边带调制器等。以图 2-9 所示为例，这个调制器对调制信号与载波信号作乘法和加法运算。高频的信号乘法可以使用其他方法实现，如图 2-10 所示的平方律调制器。

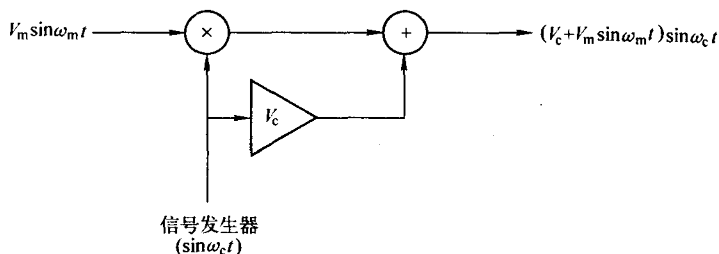



图 2-9　一个 AM 调制器

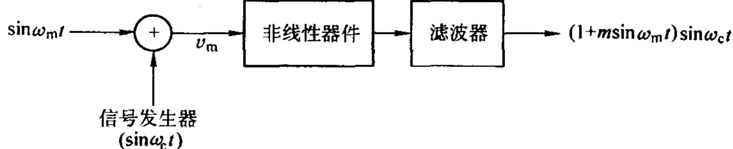



图 2-10　一个 AM 平方律调制器

频率调制器的每一个信道使用不同的频率，因此可以使用许多并行的信号。通常使用放大器级联来产生频率调制的信号。还可以通过直接变化振荡器的频率或者间接进行相位调制来完成频率调制。因此，有两种产生 FM 信号的方法：直接方法和间接方法。

在直接方法中，载波信号的频率是直接随输入调制信号变化的。压控振荡

器是用于控制载波信号频率随基带信号幅度变化的组成单元。

在间接方法中，窄带 FM 信号由一个平衡调制器产生，而频率乘法用于增加频率偏差和将载频增加到某一特殊值上。

图 2-11 中的框图表示的是每个信道都采用 FM 的频分复用系统。在这个系统中，每个信号都采用抑制载波调制，每个信道都有自己的放大器、振荡器、平衡调制器和边带滤波器。信道通过加法器和分组滤波器集合在一起；组信道可以进一步组合成一特大组，特大组组成高级组。

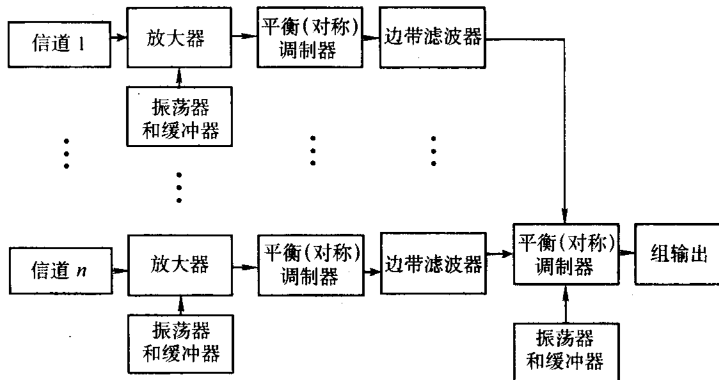



图 2-11 一个基本的多信道 FDM

在数字系统中，由基带数字信号来调制载波；与模拟系统相比，它提供了更多优点因而被广泛应用于现代无线通信系统中。与模拟系统中的 AM、FM、PM 相对应，数字系统中采用的调制方法为幅度键控（ASK）、移相键控（PSK）、移频键控（FSK）。

PSK 调制器均采用一种主要技术，但有多种不同形式。典型的 PSK 调制器是二进制 PSK（BPSK）、四进制 PSK（QPSK）及其他。

在 BPSK 中，两个信号的相位相差 180°。图 2-12 为一个平衡 BPSK 调制器。幅度调制器受一个逻辑电路控制，平衡调制器的输出结果直接输入放大器。

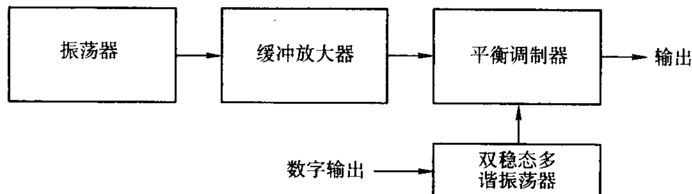



图 2-12 BPSK 框图

四进制相位键控包括 4 个相位，每两个相邻相位间隔 90°。每个脉冲表征 2bit 信息（00、01、10 或 11）。QPSK 调制的一个重要变形是 π/4-DGPSK 调制。

这是一种微分四状态的 PM 技术，这种技术中相位的状态的确定需要参考上一个脉冲信号。信息是通过一个脉冲到下一个脉冲的相位的变化来传递的，而不是通过绝对相位。π/4 指的是相对于参考相位的最小相位变化是 45°。

8 状态移相键控（8-PSK）是使用了 8 个相位状态，相位间隔为 45°。每个脉冲表示 3bit 信息（000、001、010、011、100、101、110 或 111）。

十六进制正交移相键控（16-PSK）每个脉冲可以表示 4bit 信息。16-PSK 的改进版是 16-QAM（16-Quadrature Amplitude Modulation，十六进制正交幅度调制）。16-QAM 使用 4 个相位状态和 4 个可用幅度。这种 4 × 4 的组合最后构成 16 种调制状态。

FSK 调制器主要用于数字数据传输，并且是只能使用两种频率状态的标准调制器。

以上所有方式将在 2.5 节中进行详细叙述。

### 2.3.8　解调器

解调器位于接收端，将传输来的发射机信号进行解码。对于成功的发射和接收，接收端的解调器和发射端的调制器必须是相互匹配的。因此，对应于调制器，解调器可以是幅度、频率或相位解调器。

幅度解调器将一个幅度调制的 RF 信号转化为一个与调制信号相同形式的声音、视频或脉冲信号。AM 解调器中有一类很重要的解调器，叫做包络检测器。改良型的包络检测器包含音量控制和自动增益控制等功能。

另一类幅度解调器是乘法解调器，它包含一个平衡解调器或平衡混合电路和滤波器。乘法解调器用于解调单边（SSB）或双边（DSB）信号。它们用二极管或晶体管制成。

频率解调器，如熟知的 FM 检测器，它们通过使用二极管、变压器、鉴别器、整流器、限流器和滤波器来解调接收到的信号。图 2-13 为一个带有锁相环（PLL）的 FM 检测器。在 PLL 检测器中，当频率改变时，误差信号需要跟踪频率的变化，然后使误差信号成为一个与接收信号成比例的测量值。

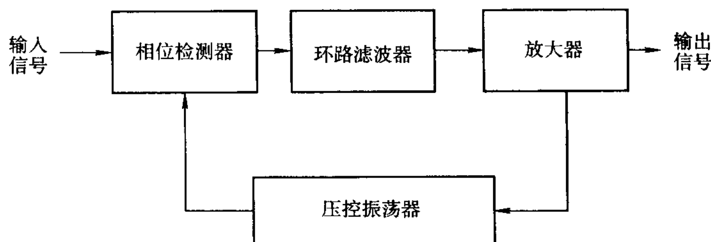



图 2-13　一个 PLL FM 检测器

相位检测器需要使用滤波器、功率分配器、连接器和混合器，如图 2-14 所示。相位检测器的结构随着其处理的信号类型（例如，BPSK 或 QPSK）的不同而不同。在 BPSK 检测器中，更多使用的是双平衡二极管混合器。在这种情况下，混合器的一个输入是 IF 放大器输出的相位调制的载波频率，另一个输入是振荡器输出的参考载波频率。所以，混合器的输出信号的频率是 $f_{out}=f_{in}-f_c$ 或 $f_{out}=f_c-f_{in}$。准确的频率和相位角度可通过适当的同步技术达到。

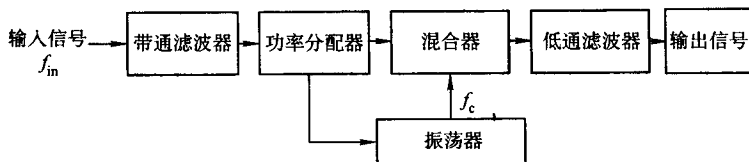



图 2-14 一个典型的 BPSK 相位检测器

QPSK 解调的每个脉冲包含 2bit 信息。QPSK 解调器是由滤波器、三值功率分配器、平衡混合器、正交相位连接器、加法器和计时电路构成。在某些情况下，额外的功率分配器用在输出端以恢复载波频率。计时电路决定了二进制状态信号是 1 还是 0，并且还为并行信号转化为串行信号提供了必要的时延。

在解调过程中，要求接收信号的载波和接收机的振荡器相位同步，这种方法叫做相干检测。相干检测器，也叫做相关器，它提供高信噪比，因此出错的概率就很低。相干检测器要求接收机的本地振荡器的相位必须与接收信号的载波相位一致。以上称为“载波恢复”，它需要两者的相位高度要一致，这样实现起来电路较复杂，而且当信号功率低或有较大的干扰和信号衰落时，实现起来会更困难。

相比而言，一些调制的波形可以使用非相干检测解调出来。非相干检测是用一系列滤波器去判定接收信号的频率并同时消除干扰。由于它的简单性，非相干检测器经常被使用。

## 2.3.9 复用器

在传统的通信系统中，许多不同的信号（例如，数据、图像、声音）通过两种常用的复用方式在单个通信链路中传输。这两种复用方式是频分复用（FDM）和时分复用（TDM）。但是，近几年来码分复用（CDM）也加到常用复用方式中，并被广泛应用于通信系统中。在 FDM 中，几个信道被集中在一起，每个信道分别占用总频谱的一部分，而相互占用的频段又不重合。在 TDM 中，信道共享时间。FDM 和 TDM 在本节中进行讲解，CDM 将在 2.4 节中进行讲解。

图 2-15 为一个简化的 FDM 系统框图。许多不同的信号输入到每个子信道进行调制。振荡器用来为每个信道提供所选定的频率。每一特定组中的每个调制

器的输出结果，通过 RF 加法电路都将加上一个导频信道振荡器信号。这些混合信号再送入一个混合器，这个混合器的作用相当于一个增频变频器。

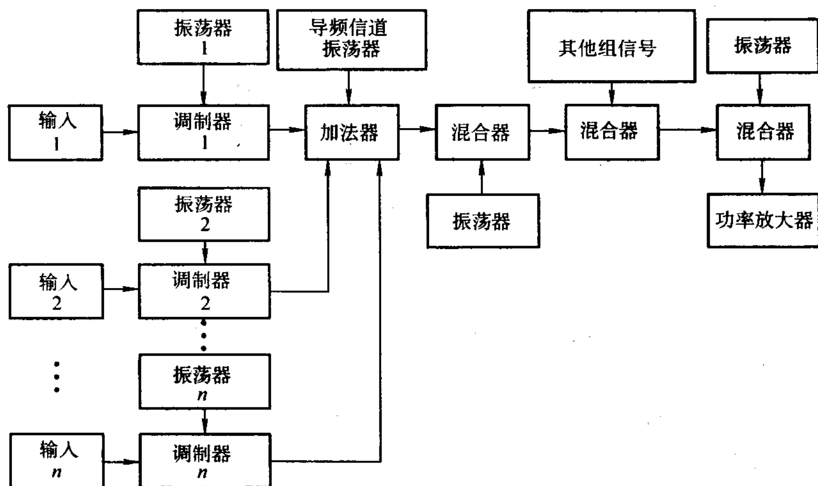



图 2-15　一个简化的 FDM 系统框图

下一步，将来自不同组的调制器的输出结果组合在一起。因为混合器可以配合每个组的载频而使用不同的频率，所以每个组的信号都可与其他组的信号区分开来。这样在接收端就可以恢复每个原始信号。功率放大器链用来将要传输的组合信号的功率放大到所需的输出水平。功率放大器再将所有的信号传送到发射机的发射天线。

图 2-16 为一个典型的 TDM。模拟信号输入到抽样电路中使其变换为数字信号。延迟线的作用是将数据时段化。延迟线数据会在输出阶段进行重组。输出阶段包括许多器件，有混合器、振荡器、功率放大器和发射机天线。

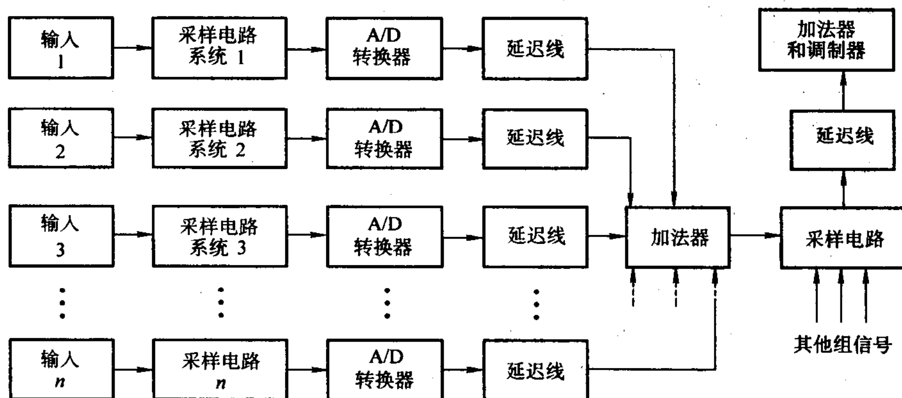



图 2-16　一个典型的 TDM 系统

图 2-17 说明了一个信道的时间共享概念。在这个特例中，有 36 个主要时隙，同时在每个主要时隙中有 12 个次要时隙。结果在数据传输中共有 432 个可用时隙。

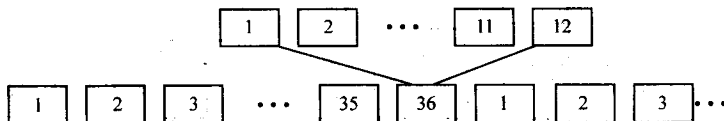



图 2-17 TDM 中的时隙分配

## 2.3.10 天线

天线是用于接收或辐射电磁能量的设备。它可以看作是将电能变为电磁能形式的转化器，反之亦可。天线有两个基本的功能：接收天线截取电磁能并通过适当的电力设备将其转化为电能，发射天线通过电力设备将电信号转化为电磁能。电磁能如 2.2 节中叙述的那样，在空间中以电磁场的形式传播。

传输天线是一个将电能转化为电磁辐射的转化器。如果电磁辐射在各方向上都是均匀的，这种天线就称为等方向性天线。一个等方向性天线是全向的，并在同一水平面上的各个方向上辐射相等的能量。相反，方向性天线只在某一个或多个特定方向上辐射功率。如果方向性天线只在一个方向上辐射功率，就说它是单向的；如果它在两个方向上辐射，就说它是双向的。

由于天线的形状、构造和材料不同，就会有许多不同类型的天线。RF 系统中常用细线的单极化天线。这种天线的运行原理与同轴电缆的原理相同。单极化天线有各种型号，包括宽带的、圆锥的、大尺度和小电力单极化天线。通常使用同轴传输线将信号输入到天线。电缆和天线之间的电阻匹配是由低频的集中参数感应电容电路和高频短截匹配电路完成。

鞭形天线与单极化天线相似，但是鞭形天线是由活动杆制成的。鞭形天线在根本上是电容性天线或双导电天线，它由一个绝缘支架支撑并与其他结构隔绝，即是绝缘的。鞭形天线的长度通常是辐射电磁波波长的十分之一或五分之一。鞭形天线可能是移动通信中应用得最为广泛的一种天线。普通模式的螺旋天线可能是应用第二广泛的天线。

微带天线因其低调的外表和在印制电路上容易构成而较为流行。微带天线也可制作成各种形状和尺寸，同时还可以使用电解质作为构成材料，而这种电解质能够装在较小的空间内。它的缺点是有效性较低。

细线偶极天线是通信系统中最为常用的天线之一。同时还有原理相同而运行方式不同的其他天线，包括电小偶极天线、发偶极天线、折叠式单极化天线和旋转天线。

除此之外，还有很多不同种类的天线：八木式、同轴式、环形、螺旋形、对数周期式、隙式、凹口式、触角式、透镜式和反射器式天线。另外，每种类型的天线的形状和运行原理都不同。

天线也可排成阵列。阵列天线集中了各种天线阵元，如单极化、隙式、环状、微带等。两种常用于天线阵列中的是八木-宇田天线和对数周期天线。八木-宇田天线包括三个或更多半波阵元，一个驱动，一个反射，一个或多个控制。八木-宇田天线提供高方向性和高增益。对数周期阵列是多阵元、单一方向、窄波束天线，它的电阻和辐射特性是激发频率的对数函数。这样的结果使对数周期阵列中阵元的长度和间隔从开始阵元到结束阵元都成对数地增加。对数周期天线常应用于宽带系统中。

阵列天线的另一类是平面或扇区天线，它们有多个阵元来辐射和接收来自同一小区内的不同扇区的信号。平面或扇区天线常常是平面状的且用塑料包裹，用于隔绝其他阵元或其他金属以及其他带电元件。

在频率低于3GHz的通信系统中，应用了许多不同类型的天线，包括单极化天线、偶极天线和阵列天线。碟形卫星天线常用于微波频段，即接近3GHz或更高的频率。在长距离传输，卫星通信和其他高带宽微波系统中，最普遍的天线类型是碟形卫星天线。常用于数据传输的天线包括全向天线、方向天线、阵列天线、微波传输带、平面天线和单极化天线（例如，移动天线）。

## 2.3.11 相位检测器和移相器

相位检测器是一种输出电压为直流（DC）的电路，而这个直流电压与两个频率相同但相位不同的信号的相位差成正比。使用两个平衡混合器可以构成一个简单相位检测器。在可为本地振荡器提供两个RF信号和两个RF输入终端的前提下，以上的混合器可以被设定为相位检测器。相位检测器（混合器）的直流输出会被IF的输出终端检测到。

移相器是一个两端口设备，可根据外部信号来改变输出信号的相位。两种基本的移相器分别为模拟型和数字型。模拟移相器依靠一个模拟信号改变输出相位。数字移相器通过数字信号改变输出相位。虽然模拟和数字移相器的种类非常多，但最常用的是可变移相器，它可以应用一个可变的控制信号来改变信号的相位。

## 2.3.12 功率分配器和功率合成器

功率分配器可将一个输入信号分成相位相等幅度相同的多个输出信号。同时，功率分配器也可以倒过来把输出端口作为输入端口，以当作功率合成器来使用。功率分配器可将输入信号分为2个、3个、4个、5个、6个、7个和8个

输出。

功率分配器分为0°、90°（90°混合式）和180°（180°混合式）分配器。一个0°功率分配器将一个输出信号分成两个或多个信号，理论上这些信号的相位和幅度是相等的。在各种混合式分配器中，输入信号被分为相位不同但是幅度相同的多个输出信号。一个90°混合式功率分配器将信号分为两个幅度相等但相位偏移90°的信号。当一个180°混合式功率分配器只使用一个输入端时，信号将分为两个幅度相等相位相同的信号。当把两个相同的信号输入到两个输入端口时，分配器将产生两个幅度相等相位偏移180°的信号。所有的功率分配器都可以当作功率合成器使用。

功率分配器的性能指标包括频率范围、插入损耗、隔离度和RF连接器类型。插入损耗定义为除功率分配因子外元器件测量的损失，单位为dB。功率分配因子等于输出功率与输入功率的比值。隔离度是任意输出端口的隔离程度，单位为dB，等于一个输出端口的功率和任意一个输出端口的功率的比值，此时其他端口接入匹配终端。常用插入式功率分配器包括表面突起式、扁平集成电路式、通孔式或插电式和使用微波引导装配技术的功率分配器。

### 2.3.13　RF变压器

变压器是通过电磁感应现象将电能从一个电路转移到另一个电路中的设备。RF变压器用于增加或减小电压。电压的增加或减小由第一和第二线圈匝数的比值决定。如果匝数的比值大于1，此变压器为升压变压器，说明其输出电压的幅值大于输入电压。如果匝数的比值小于1，此变压器为降压变压器。RF变压器起初只用于低功率电路，以阻抗匹配为目的，从而达到最大的功率转换效率。变压器在保持交流（AC）电连续性的同时，在输入和输出电路间提供直流（DC）隔离。

RF变压器的性能指标是运行频率范围、3dB带宽、幅度的不平衡性、相位的不平衡性、电阻率、插入损耗、额定直流电流、直流电阻和运行温度。3dB带宽是指小于中心频率的插入损耗3dB的频率范围。幅度平衡是每个中心抽头式变压器的输出信号相对于中心抽头位置的信号幅值的绝对差值。相位平衡，在某种程度上是指每个中心抽头式变压器的输出信号相对于中心抽头位置的信号相位的差值。电阻率是匝数比的二次方。插入损耗是元器件的测量损失，它被定义为输出功率与输入功率的比值。额定直流电流是在没有热散失或其他损失的情况下通过变压器线圈的持续直流电流。

RF变压器的其他指标包括变压器类型、包装类型、包装方式、中心抽头选项和连接器类型。典型的变压器的类型包括电信、电流感应、功率和巴仑变压器。包装类型包括表面突起式、扁平集成电路式、通孔式和插电式。包装方法

包括磁带卷轴式、碟式、管式和散装式。中心抽头选项可以仅是第一边，仅是第二边，或两边都有。

### 2.3.14 EMI和RFI滤波器

电磁干扰（EMI）这个术语可以用无线电频率干扰（RFI）来替换。EMI是指电磁能量在所有可能频段上的干扰，而RFI是指无线电频段内的干扰。EMI和RFI都可以通过使用滤波器来消除。EMI和RFI滤波器包括串联电感式承载组件和并联电容式非承载组件。非承载组件能够为需保护的电路提供低的电阻环绕，保护其免受高频噪声的干扰。由傅里叶变换可证得，当一个脉冲含有较高的频率分量时，滤波器将会带来衰减。

EMI和RFI滤波器的重要指标是额定电压、额定电流和插入损耗。插入损耗是对滤波器的衰减特性的描述，单位为dB。插入损耗是指在未安装滤波器前的噪声水平与安装滤波器后的噪声水平的比值。其他重要的指标还有运行温度及温度范围。

### 2.3.15 其他组件

延迟线是用来放慢事先调整的信号时间间隔的设备。延迟线有两种基本类型：主动延迟线和被动延迟线。主动延迟线起初是配合数字组件来延迟数字信号的。被动延迟线用来配合模拟组件，但它既可以延迟模拟信号，又可以延迟数字信号。

双工机允许单个天线来接收和发送信息，使用一种频率的发射机和使用不同频率的接收机可以使用同一根天线。复用器的任务是使两RF信号在最小的互感和衰减情况下协调发送和接收时间的分配。

从另一个角度上来说，天线分离滤波器很像多路复用器。它是一个三接口、与频率相关的设备，用于不同信号的分离和结合。一个典型的天线分离滤波器包括共用一个公共接口的两个固定调谐带通滤波器。这个公共接口和两个滤波器的输出端口构成了天线分离滤波器的三个接线端。接入公共端口的信号依据通过滤波器的带通频率被分割开来。

无线电频率双工机和天线分离滤波器包含了表面突起、扁平集成电路、通孔、电源插入和微波导向装配技术。当使用RF天线分离滤波器和双工机时，需要考虑的一个重要性能指标是接收机对传输信号的信号排斥，反之亦然，还有插入损耗和VSWR。

隔离器和循环器是用来控制RF信号传播的两种被动设备。一个隔离器保证信号从一个方向传输，同时提供较高隔离度防止来自反方向的反射信号。一个循环器包括三个或更多的接口，它允许一个接口输入的信号转移到顺时针或逆

时针方向的相邻接口。

增频变频器和降频变频器都是用于在大的频域范围内改变一个 RF 信号的频率。

## 2.3.16 RF 收发机

收发机是用于传输和接收 RF 信号的通电设备。在传输时，发射机的功能是对所有必要的 RF 信号进行处理，如将信号提供给天线之前对信号进行调制、增频变频和功率放大。RF 发射机的结构没有很高的灵活性，它们的制作仅仅是在一些形式上有所区别。但是，RF 接收机的制作工艺有所不同，例如外差法、零差法、像频干扰抑制法、数字 IF、子抽样原则等。

外差接收机将接收到的信号频率转化成非常低的频率，以降低信道选择滤波器对 Q 因子的要求。这个转化的过程是由一个混合器来实现的，通常也叫做降频变频器。设计外差变频器时，IF 是降频变频器的中心频率，因此它是一个很重要的参数。

零差接收机是将接收到的信号变频到载波频率。信道选择要求必须是低通滤波器并具有相对较迅速的终止特性。

像频干扰抑制接收机由于存在图像的负复制，允许图像消除，因此它处理信号和图像时是有所差异的。由于图像和信号的频率分别落在本地振荡频率的两侧，所以区别信号与图像是可能的。像频干扰抑制接收机有许多不同种类，如 Hartley 结构式接收机和 Weaver 结构式接收机。

数字 IF 接收机是以低频双重 IF 外差法原理运行的，所以它需要额外的混合器和滤波器电路。

因为窄带信号从一个载波循环到下一个载波循环只有微小的改变，所以子抽样接收机可以以较低的速率对 RF 输入信号进行抽样。同时，抽样接收机存在混淆现象和噪声问题。

收发机的重要性能指标是频率范围、灵敏度、输出功率和数据传输速率。频率范围是收发机的运行频率。灵敏度是在特定信噪比的情况下，能够得到特定输出时所要求的最小输入信号。输出功率是收发机可以传输的最大信号功率。数据传输速率是收发机每单位时间发出的信息量。使用双工方式时，收发机两者必须是相互匹配的。它们使用 AM、FM、开关键控（OOK）、ASK、FSK 或者 PSK 模式运行。

## 2.3.17 无线调制解调器

调制解调器（Modulator-Demodulator）是能够允许数字设备利用电话线通信的设备。无线调制解调器是用电磁波或光波来传输数据。无线调制解调器，也

叫做无线电调制解调器，是连接到数字设备串行端口（例如 RS232、RS422）的 RF 收发机。它们从另一个匹配的无线调制解调器发送和（或）接收信号。在许多应用场合中，需要将多个调制解调器连接到接入点上，以保证无线通信网络的连通性。

无线调制解调器的指标有成形因子、调制解调速度、网络类型和总线类型或接口类型。成形因子可将调制解调器分为内部和外部调制解调器。内部调制解调器是在主板的插槽上安装一个计算机卡；外部解调器是通过电缆将此模块连接到通信端口上。调制解调器的速度是调制解调器的最大数据传输速率，单位为 bit/s。无线调制解调器对应的网络分为拨号上网、以太网、全球移动通信系统（GSM）、集成业务数字网、个域网（PAN）、通用无线分组业务（GPRS）等类型。调制解调器的接口类型包括 II 类卡、III 类卡、CardBus、FireWire（IEEE1394）、ISDN BRI U 接口、串行接口（RS232、RS422、RS485）、通用串行总线（USB）接口和传输线通信（PLC）缝式接口。

调制解调器也可用无线电链路指标来分类，指标包括使用频带和无线电技术。无线调制解调器的频带可以是 900MHz、2.4GHz、5 GHz、23 GHz、VHF 和 UHF。可选的无线技术有直接扩频和跳频等。扩频是通过使用大于系统的所需带宽来减小局部频率干扰的技术。两种主要的扩频调制解调器为直接序列调制解调器、跳频调制解调器。跳频是信号顺序使用一系列窄带频率信道的技术。传输频带被划分为一定数量的信道，根据事先决定好的循环跳跃模式系统周期性地跳到一个新的信道上。

## 2.4　模拟调制和复用

调制是将一个信号从一个频率搬移或变换到另一个频率的过程。调制时，会将基带信号（语音、视频等）搬移到一个高频的载波信号上，因此载波的频率和幅度特性会发生改变。将基带信号强行移到载波信号之上叫做调制。从一个频率转移到另一个频率的过程叫做连续波形（CW）调制。在 RF 通信系统中，调制使消息以更有效的方式来传送。另外，通过复用，如 FDM，可以使多个信息同时使用同一系统发送。

考虑一个频率为 $c$ 的载波信号

$$v_c(t) = V_c \sin(\omega_c t + \phi_c) \tag{2-13}$$

式中，$v_c$ 为瞬时载波电压；$V_c$ 为峰值电压；$\omega_c$ 为角频率；$\phi_c$ 为载波相位。

在调制过程中，可以利用载波的一个或多个特性进行调制，这些特性包括幅度、频率、相位等。对应出现了三种调制技术：AM、FM 和 PM。

数字信号也可以进行调制。在对数字信号进行调制时，数字信号用于调制

载波的幅度、频率、相位等特性，也可以对多个特性进行复合调制。有关数字信号的调制部分将在 2.5 节中描述。

### 2.4.1 幅度调制

AM 中，载波幅度将随基带信号的幅度变化而成比例地变化。AM 信号波形被称为调制包络，如图 2-18 所示。图中载波信号被正弦信号所调制。

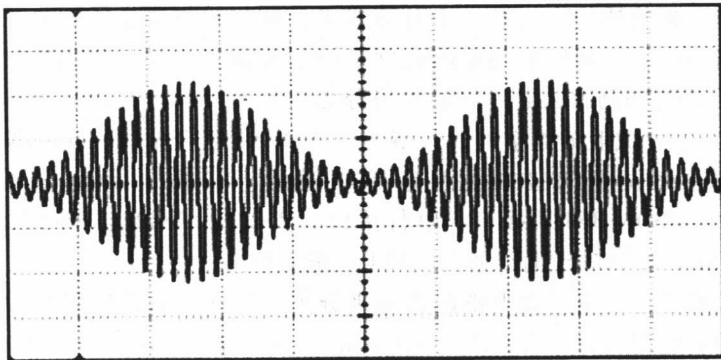


图 2-18 AM 波形

当用一个频率变化范围为 $f_l \sim f_h$ 的基带信号去调制一个频率为 $f_c$ 的载波信号时，调制结果将占用新的频带，且其带宽遵循一定的变化。

例如载波信号为 $V_c \sin(\omega_c t)$，调制信号为 $V_m(t)$，忽略相位，则 AM 信号可表示为

$$v(t) = [V_c + v_m(t)]\sin(\omega_c t) \tag{2-14}$$

假设调制信号（如基带信号）为 $v_m(t) = V_m \sin(\omega_m t)$，则

$$v(t) = [V_c + V_m \sin(\omega_m t)]\sin(\omega_c t) \tag{2-15}$$

使用三角变换公式将上式展开为

$$v(t) = V_c \sin(\omega_c t) + \frac{V_m}{2}\cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{V_m}{2}\cos(\omega_c + \omega_m)t \tag{2-16}$$

包络的最大幅度为 $V_c + V_m$，最小幅度为 $V_c - V_m$，上式中包含三个不同频点：$f_c$、下频点 $f_c - f_m$、上频点 $f_c + f_m$。

虽然载波信号的频率是一个固定值，但是调制之后的信号的频带则介于上频点（$f_h$）和下频点（$f_l$）之间。因此，已调信号的频谱中将出现一个上边带和一个下边带，如图 2-19 所示。

已调信号占用带宽的大小要依调制方式的不同而定。传统 AM 所需要的带宽是基带信号频率最大值的两倍。单边带（SSB）调制中，已调信号带宽则与基带信号带宽相等。

AM 的调制系数（$k$）定义为基带信号幅度的峰值与载波信号幅度的峰值之

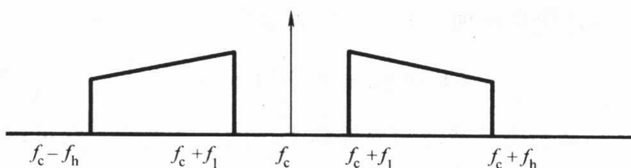



图 2-19 AM 波形的频谱

比，如正弦调制信号 $v_m(t)=V_m\cos(2\pi f_m t)$，它的调制系数为

$$k=V_m/V_c \tag{2-17}$$

调制系数经常以百分数的形式出现，对应的调制也经常被称为百分比调制。调制系数的重要性在于，它决定了信号中边带和载频的功率关系。

AM 的种类很多，包括双边带（DSB）调制、残留边带（VSB）调制、SSB 调制等，这些调制在这里不做详细介绍。

## 2.4.2 频率调制

FM 中，载波信号的幅度保持不变，频率随着调制信号幅度的变化而成比例变化。图 2-20 给出了一个二进制 FM 信号波形。

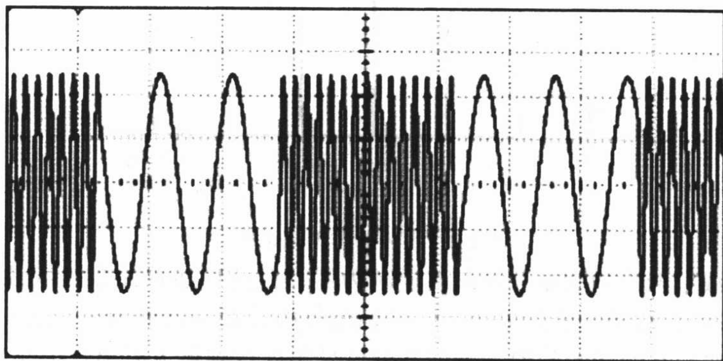


图 2-20 FM 波形

当调制信号幅度达到最大时，载波信号频率取最大值。当调制信号的幅度在最大值和最小值之间变动时，载波信号的频率也将在最大值与最小值之间变动。这一过程称为频率偏移。

例如载波信号为 $V_c\sin(\omega_c t)$，调制信号为 $V_m\sin(\omega_m t)$，忽略相位，则调频信号的频率可以表示为

$$f=f_c+f_\Delta V_m\sin(\omega_m t) \tag{2-18}$$

式中，$f_\Delta$ 为偏移常量。因此，调频信号可以表示为

$$v(t)=V_c\sin[2\pi(f_c+f_\Delta V_m\sin(2\pi f_m t)t] \tag{2-19}$$

由于上式中的 sin（•）表示式包含了 sin（•），所以对它的求解需要用到一

阶贝塞尔函数。通过代数处理，上式可以表示为

$$v(t)=V_c\sin\left[2\pi f_c t+\frac{f_\Delta}{f_m}V_m\cos2\pi f_m t\right] \tag{2-20}$$

频偏（$\Delta f$）是调制信号载波频率偏移大小的一个度量，它可以表示为

$$\Delta f=f_\Delta V_m \tag{2-21}$$

FM 中，理论上是没有频率偏移的最大值，但是对于一个特定系统，由于可用带宽有限，必须确定最大频偏 $f_{max}$。

FM 的调制系数 $m_f$ 是载频频偏与调制频率的比值，即

$$m_f=\frac{f_\Delta}{f_m} \tag{2-22}$$

调制系数决定了已调信号各个频率分量的幅度。它也可以用弧度的形式表示，这时用 $\beta$ 表示。

从上面的公式可以看出，FM 需要更多的带宽，这正是其频率利用率低的原因之一。然而，FM 在改善噪声环境方面却有较好的性能。FM 在中心载频 $f_c$ 两边产生了无限多的频率分量，这些分量以 $f_c$ 为中心对称相等，如图 2-21 所示。

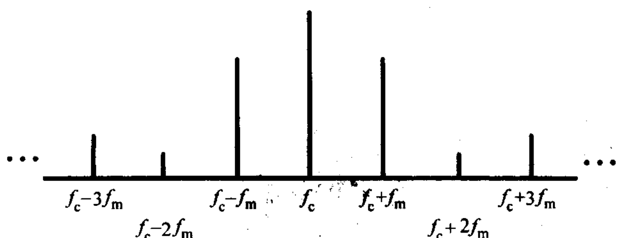



图 2-21 FM 的典型频谱图

FM 中载频两边的频率分量最终递减为零，但这种递减并非是线性的，而是以零为中心左右波动。实际应用中，已调信号的带宽可近似为 2（$f_{max}+\Delta f$）。其中 $\Delta f$ 为载波信号的最大频偏，也即基带信号幅度达到最大时出现的频偏。

## 2.4.3 相位调制

模拟信号的 PM 类似于 FM。载波信号的瞬时相位将在（$\phi+\Delta\phi$）与（$\phi-\Delta\phi$）之间变化，这种变化与载波信号频率和调制信号幅度成一定的比例。PM 可以表示为

$$v(t)=V_c\sin(\omega_c t+\phi_m\sin\omega_m t) \tag{2-23}$$

式中，$\phi_m$ 为调制系数。

虽然 PM 与 FM 表达式相似，但两者在意义上却有很大的不同。PM 中相位的最大偏移主要取决于调制信号的幅度，而与调制信号的频率无关。此外，在实际应用中，PM 用得较少，有时可用于 FM 的中间步骤。

在通信系统中，许多不同信号可以通过适当的复用技术在同一条通信链路上进行传输。模拟信号的复用技术有频分复用（FDM）和时分复用（TDM）两大类。下一节将对这两种复用技术进行简要分析。

## 2.4.4　频分复用和时分复用

FDM 将每个信道限制在一个频带之内，如图 2-22a 所示。通过使用 FDM 技术，许多不同信号（如多个用户的语音信号）可以同时在一条通信系统链路上传输。由于邻近信道频谱的相互重叠将会导致不同用户间串话，为了避免这种情况的发生，不同信道间要使用空频带隔开。这些空频带也称为保护频带。使用保护频带，便于接收端对信号的滤波以及对不同频率的选择。通过使用正弦载波调制，可以把不同用户的信号调制到它们各自所分配的频点上。不同频点对应于不同信道。在 FDM 系统中，系统主要分配的信道可以划分成许多个子信道，它们都是同时发送的，因而可以由统一的物理电路来实现。

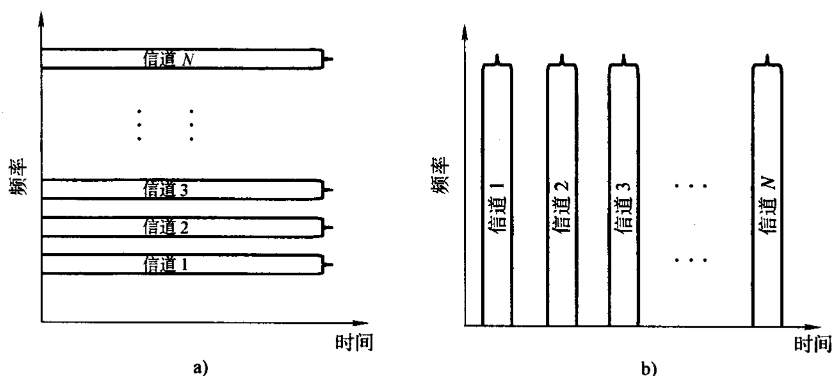



图 2-22　a）频分复用　b）时分复用

时分双工为各个不同输入信道分配不同的时隙，这些信道使用相同的带宽。在 TDM 中，任何时刻都只能由一个用户传送信号。图 2-22b 给出了对应的示意图。由图可见，信道 1 占用了第一个时隙的所有频带，信道 2 占用了第二个时隙的所有频带，……以此类推。

上述技术的一种典型应用是无线模拟遥测信号的传输。遥测信号使用复用技术来传输远端测试仪或传感器等传来的信号。遥测技术使用多种测试元器件，并采用了比较具有代表性的模拟信号复用技术。FDM 和 TDM 都可以应用于遥测技术中。若使用 FDM，则在频谱上使用多个并行且独立的频率信道来传送不同用户的数据；若使用 TDM，则传送数据随时间而变，只允许每种元器件在其对应的时隙信道上传送数据。例如，用户 1 的数据在信道 1 中发送，用户 2 的数据在信道 2 中发送，之后是用户 3 等，直到所有用户的数据都被发送，在这一过程

中，它们使用相同的频带传送数据。

许多遥测系统同时使用窄带和相对宽带信道，这种混合技术实现了一种称为子通信的过程。子通信技术主要是将一个宽带信道细分成多个窄带信道进行通信。

## 2.5 数字信号的调制和复用

由于数字信号处理以及相关技术的不断发展，现代通信系统的操作性能也得到了较大的增强，信息流的安全性也比以前提高了很多。信息流安全性的提高主要得益于密码学、扩频以及其他相关技术的发展和应用。然而这些技术的应用却难以在模拟系统中简单实现。众所周知，几乎所有的通信系统都要关心的两个问题就是：如何使用尽可能少的带宽，以及如何使得传输过程中的误比特率最小。数字信号通信系统更好地兼顾了这两个问题，并且具有许多其他模拟系统所没有的优点。

数字通信系统之所以受到广泛应用，其中的主要因素之一便是数字信号调制技术的应用。数字信号调制技术相对来说是一种新的调制方法。由于数字通信应用的不断增加，数字信号调制技术得到了快速发展。数字信号调制技术可以分为三类：振幅键控（ASK）、移频键控（FSK）、移相键控（PSK）。这三类调制技术分别类似于模拟信号调制技术中的 AM、FM 和 PM。

### 2.5.1 振幅键控

ASK 是 AM 的一种简单形式，可以通过对载波信号的开-关键控来实现。其中，二进制“1”代表开状态；“0”代表关状态。虽然这种调制的方法简单且容易实现，但是它却没能在数字通信中得到广泛应用。其中一个主要原因是这种调制方法使得接收端接收到的信号强度变化太大。

ASK 数字信号可以通过数字信号乘以载波信号得到，对应的数学表达式如下：

$$v_c(t) = h(t)\cos(\omega_c t) \tag{2-24}$$

式中，$h(t) = A$ 或 0。

通过两个信号的相乘，可以将原数字信号的频谱搬移到以载波频率为中心的频段上。已调信号带宽是原信道带宽的两倍。

对于例如 Murray 码等复杂度比较高的码来说，ASK 不是一种很理想的调制方式。特别是在噪声较大的环境下，这种开-关键控的方式可能给接收机带来严重的噪声问题，使得判决器对 1、0 的判断更为困难。在某些简单的方案中，二状态和四状态 AM 与脉冲 PM 结合使用，这样可以增加传输中每波特或每脉冲携

带的比特数。

### 2.5.2 移频键控

FSK 等价于二进制模拟 FM。在 FSK 中，二进制“0”使用载频为$f_0$的载波信号进行传送；二进制“1”使用载频为$f_1$的载波信号进行传送。调制过程中，信号波形的幅度保持不变，如图 2-23 所示。二进制信号可以使用比模拟信号更有效且简单的方法去调制载波信号的频率。实际应用中，频率的变化只有几 kHz。

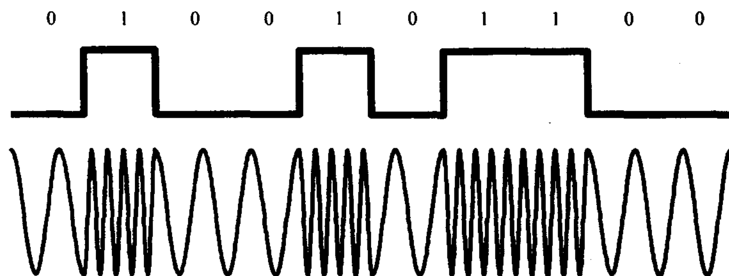



图 2-23 FSK 信号波形

FSK 信号可以看成是两个具有不同载频的 ASK 信号之和。因此，FSK 信号的频谱是两个 ASK 信号频谱之和。接收机只要能够区分这两个不同载频$f_0$和$f_1$，便能成功地接收信号。这一点在移动通信系统中尤其重要，特别是在为了最小化传输带宽而采用重叠频谱进行传输的情况下。

标准的 FSK 中使用两个独立的载频$f_0$和$f_1$来分别传送二进制“0”和“1”。为了尽可能地减小误比特率，载频$f_0$和$f_1$必须是正交的，即它们之间的相关系数为零。为了最小化传输信号的带宽，有必要找出既是正交，且相差又是最小的$f_0$和$f_1$。这种调制方法称为最小移频键控（MSK）。例如，若载频$f_0$对应的周期是$n_0$倍比特周期$T$，则载频$f_1$对应的周期是$n_1$（$=n_0+0.5$）倍比特周期。这时，$f_0$和$f_1$正交。换一种方式表示，即（$f_1-f_0$）$=1/(2T)$。这说明了 MSK 是一种 FSK，它的$f_0$和$f_1$之差最小。

以往的无线通信链路的数据传送用的调制方式主要是 FSK，这主要是因为模拟 FM 可以很容易地被 FSK 替换，并且有些承载模拟信号的接收机也能够应用于 FSK 中。但是，用于数据传送的无线链路主要还是使用 PSK 调制，这是因为这种调制方式在频带和功率需求等方面的效率较高。

### 2.5.3 移相键控

PSK 技术起先主要应用于深空探测通信系统中。现在这种调制技术已经广泛应用于军队、工业和民用通信中。这种调制方法主要是通过载波信号的相位在几个离散值之间的变化来实现。二进制 PSK 的性能与 FSK 相似。然而，这两

者之间却有很大的区别——PSK 的带宽需求比 FSK 要少，主要是因为 PSK 信号的传送只使用了一个载频。

有多种不同的 PSK：二进制移相键控（BPSK）、差分移相键控（DPSK），四进制移相键控（QPSK）、偏移 QPSK（OQPSK）、差分 QPSK（DQPSK）、π/4QPSK、八进制移相键控（OPSK）等。这些调制技术组成了现代通信系统的支柱。

## 2.5.4　二进制移相键控

BPSK 作为另一种二状态调制技术的形式，类似于模拟信号的 PM。在 BPSK 中，载波的频率和幅度保持不变，只是信号的相位在变化。传送的二进制符号对应于载频信号相位的 0 或 π 弧度。因此，两个二进制状态相位相差 180°。BPSK 的波形可以由下式表示：

$$v_c(t) = h(t)\cos(\omega_c t) \tag{2-25}$$

式中，$h(t) = +A$ 或 $-A$。

图 2-24 给出了 BPSK 信号波形和幅度谱图。

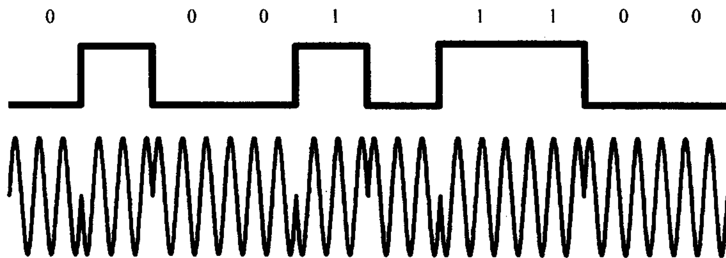



图 2-24　BPSK 信号波形示意图

BPSK 的带宽与 ASK 的带宽相似，但是由于 BPSK 信号的均值 $h(t)=0$，因此它的频谱上不存在载频分量 $f_c$。对于一些检测器，例如相干检测器，要产生所需要的载波信号相位参考值是比较困难的，尤其在多径环境下更为困难。因为在多径环境下，信号经过多径而以不同时延到达接收机。要解决这些问题，可以考虑使用 DPSK 调制。

实际应用中，参考信号由振荡器提供，发送机与接收机采用相似的参考信号。

## 2.5.5　差分移相键控

BPSK 信号可以采用 DPSK 的形式进行发送。在 DPSK 中，所发送的信号是由连续脉冲之间的相位变化来决定。通过使用前一个间隔的载波信号的相位作为参考，从而决定当前时刻信号的相位。为了实现这种调制方式，发送“0”

时，载波信号的相位保持不变；发送“1”时，载波信号的相位发生了改变。在接收端，接收机总将当前信号相位与之前时刻相位进行比较，若不发生变化，则接收到的信号判为“0”；若发生变化，则接收到的信号判为“1”。图 2-25 给出了 BPSK 与 DPSK 的原理图。

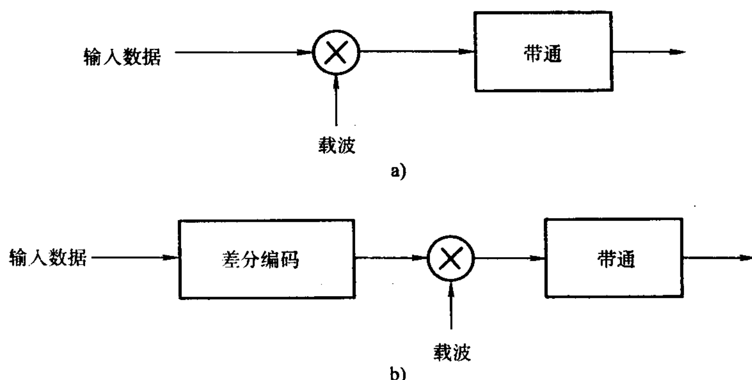



图 2-25

a）BPSK 调制 b）DPSK 调制

在 DPSK 中，接收机使用的参考相位是信号本身经过延迟一个脉冲时宽而得到的信号相位。这可以通过取模拟信号或数字信号的均值得到。图 2-26 给出了典型的 DPSK 调制框图。如图所示，相干检测器输出的信号经过一个滤波器后传给一个相关器，该相关器由时延电路和乘法器组成。如果信号相位与之前相位一致，则相关器输出正值，并被判为“0”；如果相位相反，相关器将输出负值，并被判为“1”。这种调制方法的优点之一是进入相干器的小的相位差错并不会影响相关器的输出。

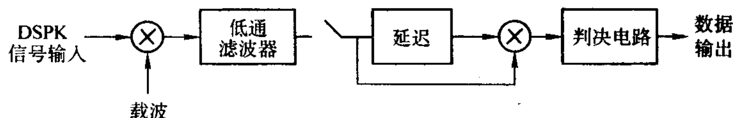



图 2-26 DPSK 信号的解调过程

### 2.5.6 四进制移相键控

图 2-27 给出了一个典型的四状态 QPSK 信号波形示意图。这种调制方式为每个发送脉冲提供 2bit 或 3bit 信息。这种 PSK 信号波形可由下式表示：

$$v_c(t) = V_c\cos(\omega_c t + \phi_k) \tag{2-26}$$

对于 BPSK，$\phi_k$ 只取两个相差 180°的值。对于四状态调制 QPSK，$\phi_k$ 取 4 个依次相差 90°的值。QPSK 等价于 PM，但是它只有 4 个变化状态，见表 2-2。

式（2-26）可以表示为

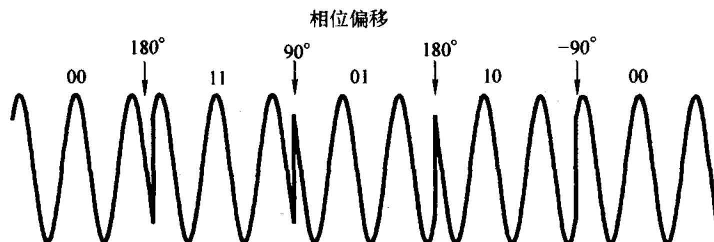



图 2-27　典型的四状态 QPSK 信号波形示意图

$$v_c(t) = V_i\cos(2\pi f_c t) + V_q\sin(2\pi f_c t) \tag{2-27}$$

式中，$V_i = V_c\cos(\phi_k)$ 为幅度的同相分量；$V_q = -V_c\sin(\phi_k)$ 为幅度的正交分量。由于信号 $v_c(t)$ 的振幅不变，只有相位改变，所以这种调制也称为恒包络调制。

**表 2-2　QPSK 中的相位偏移**

| 比特数据 | 相位 | 同相幅度 | 正交幅度 |
|---|---|---|---|
| 00 | $\pi/4$ | $+1/\sqrt{2}$ | $+1/\sqrt{2}$ |
| 01 | $3\pi/4$ | $-1/\sqrt{2}$ | $+1/\sqrt{2}$ |
| 11 | $-3\pi/4$ | $-1/\sqrt{2}$ | $-1/\sqrt{2}$ |
| 10 | $-\pi/4$ | $+1/\sqrt{2}$ | $-1/\sqrt{2}$ |

在 QPSK 中，输入数据流以双比特为单位进行分组，每组双比特产生一个对应的载波相位偏移量，这些偏移量以 $\pi/2$ 为步长。表 2-2 列出了所有可能的双比特组合和它们对应的同相幅度、正交幅度和相位偏移量等。图 2-28 给出了比特与相位的对应映射图。图 2-29 则给出了典型的双比特 QPSK 调制原理。

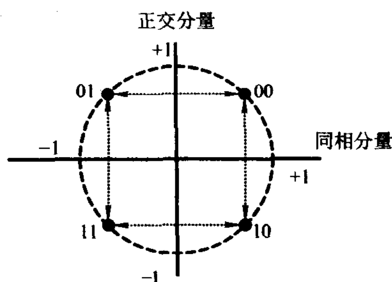



图 2-28　QPSK 调制的同相正交分量图

在接收端，数字信号通过对 QPSK 信号进行相干解调得到。解调时，需要用到两个相干解调器，它们包括两个振荡

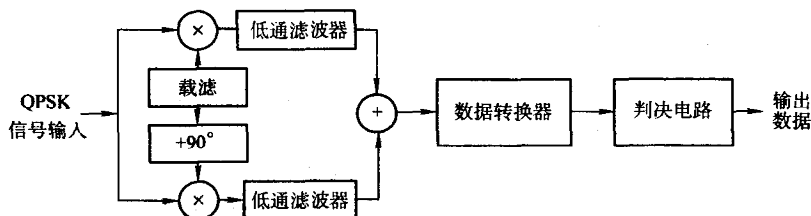



图 2-29　典型的使用两位二进制数的 QPSK 调制框图

器，分别用以产生载波信号的同相分量和正交分量。解调过程中要同时产生同相分量和正交分量数据信号，这种方案存在的缺点是，检测过程中任一路信号产生的错误都将会影响两路信号对原数据信号的再生。

## 2.5.7　偏移 QPSK

使用微波频段进行通信的通信系统（如移动系统），放大电路大都具有非线性的特点。非线性放大器适用于恒包络调制系统，因此 QPSK 是这种应用的一种较适合的调制方式。但是，当使用脉冲成形来限制传输信号的带宽时，由于变化的非线性，QPSK 信号载波包络的幅度将发生变化。在许多应用中，可通过对变化的幅度进行压缩，以使 QPSK 信号看起来像一个恒包络信号。不幸的是，这样做会抵消脉冲成形带来的传送信号带宽减少这一效果。

作为 QPSK 的一种特殊形式，OQPSK 可以解决这一问题。如图 2-30 所示，在 OQPSK 中，正交信道的信号被延迟了时间 $T$。与标准 QPSK 相比，OQPSK 载波信号相位持续的最大时间则减少了 50%。这样得到的信号在通过带通滤波器之后，信号包络变化会更小。因此，时延 $T$ 改变了传输的原始信号相位，使信号的最大相移为 $\pi/2$。

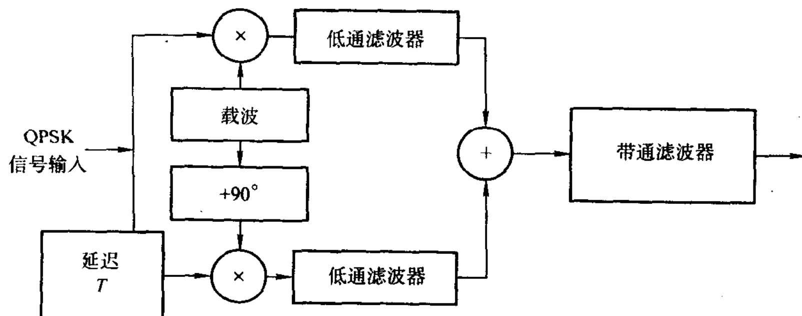



图 2-30　OQPSK 调制器

## 2.5.8　差分 QPSK

对 QPSK 信号的解调需要提供两个正交的相关解调器，并且提供适当的载波参考信号。在存在多径信号的情况下，要获得适当的参考信号是比较困难的。这个问题可以通过使用 DQPSK 来解决。在典型的 DQPSK 调制中，同相分量与正交分量的信号都要经过 $2T$ 时延。其中 $T$ 为输入调制器的信号的脉冲时宽。图 2-31 给出了 DQPSK 解调器原理。

$\pi/4$DQPSK 是 DQPSK 的一种改进形式，在这种调制中，每对双比特产生一个 $\pi/4$ 倍数的相位。传送的相位与当前载波信号的相位相对独立，其最大值为 $3\pi/4$。这比 OPSK 中的最大相位要小。虽然存在 8 种不同的载波相位，但是只有

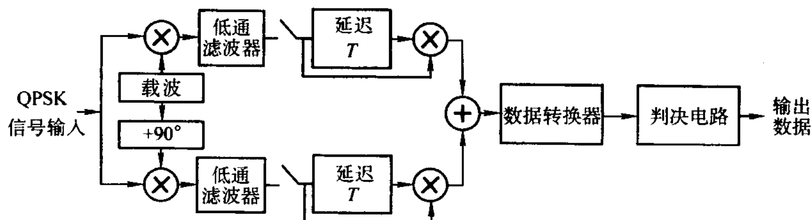



图 2-31　DQPSK 解调器原理

4 种可能的相位传输：00、01、10、11。

在接收端，通过比较当前载波相位与前一时间载波相位的相差，便能得到对应的双比特信息。这一简单操作要求同相和正交分量同时存在，以便区分出发送的是 π/4 还是 - π/4。要做到这一点，解调器的设计会变得相对复杂。

### 2.5.9　八进制移相键控

OPSK 存在 8 种状态，对应的相位改变步长为 45°。在这种情况下，调制出来的每个脉冲信号对应的是 3bit 信息。

在 16-相键控（16-PSK）中，相位改变的步长为 22.5°，因此允许每个脉冲携带 4bit 信息。16-PSK 的一个改进版本是 16-幅度相位键控，它常用于大容量的 TDM 系统中。

### 2.5.10　数字复用

和模拟系统一样，数字复用也是基于 FDM 和 TDM 技术的。尽管 FDM 和 TDM 都能用于数字通信中，但 FDM 主要用于大区域且终端数据传输速率较低的系统中。而 TDM 适用于高速率终端簇集中的本地区域或需要进行长途通信的系统中。表 2-3 比较了 FDM 与 TDM 在数字通信中的不同应用。

表 2-3　数字通信中 FDM 与 TDM 的不同应用

| 作用 | FDM | TDM |
|---|---|---|
| 信号类型 | 模拟信号，信道中传送原信号 | 数字信号，信道中传送信号的抽样值 |
| 速率 | 低，依赖于可用的带宽 | 高，依赖于信道和调制 |
| 发送 | 并行 | 串行 |
| 网络类型 | 广覆盖 | 密集 |

## 2.6　扩频和多路接入技术

由于射频（RF）系统是一个带宽资源有限的系统，调整技术设计的主要目标之一就是减少传输信号所需的带宽。扩频技术要求传送信号的带宽比原信号

带宽大几个数量级。当然，对于单个用户来说，这种系统的带宽利用率是相当低的，但是它允许许多用户使用相同的频带而不造成严重的用户间干扰。在多用户系统中，扩频技术的频带利用率较高。扩频同时也能解决许多诸如多址干扰（MAI）等问题。

除了占用一个较大的频带外，扩频还具有的特点是——扩频信号一般是伪随机信号。与一般的数据信号相比，该伪随机信号具有类似噪声的特点。伪噪声序列或伪噪声码决定了整个扩频。这些伪噪声序列或伪噪声码看起来几乎是随机的，目标接收机却能通过某种确定的方式将它们产生出来。在接收端，扩频信号的解调是由一个互相关过程来实现。所用到的伪随机载频由本地产生。利用伪随机序列的相关和互相关特性，对扩频信号进行解扩，之后再对窄带信号进行解调处理，从而恢复出原信号。

伪随机噪声（PN）实质上是对一串二进制序列进行一定的自相关操作，这种自相关代表了一种伪随机序列的自相关。同时，这种自相关也代表了限带白噪声的自相关。虽然伪噪声是可以被确定的，但是作为一个随机二进制序列，它具有如下特点：“0”和“1”的个数几乎相等，与移位后序列间的相关性很小，不同序列间的相关性很小。

扩频通信具有容量干扰受限的特点。每个用户被分配到一个与其他用户近似正交的PN码。尽管所有用户在同一时刻占用相同的频带，接收端仍然可以基于它们所使用的码来将它们区分开来。扩频技术的另一个特点是抗多径衰落。扩频信号在整个很宽的频带上都具有一样的功率，而衰落一般只发生在个别频点上。从时域上看，扩频信号具有抗多径干扰的特点，是因为不同时延的信号在接收端与原信号之间的相关性较弱，接收机可以将这些信号当成是其他用户的信号而去除。

对于以不同时延到达接收端的多径信号，可以通过一定的技术对这些信号进行充分利用，以此来改善系统性能。Rake接收机便能起到这样的作用。Rake接收机可以估计出扩频信号的各个多径时延，并将各径分量组合起来，形成一个更强的信号。Rake接收机包括多个相关器，每个相关器与信号的各个特定的时延进行相关。根据各个信号的相对强度对相关器的输出信号进行加权，最后再将它们加起来形成一个待判定的信号。

目前主要有两类扩频技术：直接序列扩频（DSSS）和跳频扩频（FHSS）。

### 2.6.1 直接序列扩频

DSSS系统是通过直接将数据与伪噪声序列相乘，来实现对基带数据信号进行扩频的系统。PN序列是由内码产生器产生的，它的一个脉冲或符号称为一个码片。同步数据符号、信息比特、二进制信道码等都是先与码片相加，再进行

相位调制的。图 2-32 给出了采用二进制 PM 的 DSSS 系统的发射端原理框图。

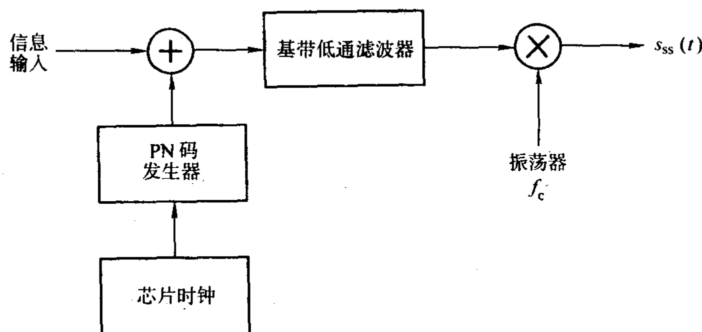



图 2-32 采用二进制 PM 的 DSSS 系统的发射端原理框图

接收端对接收到的信号的解调方式有多种。例如，可以采用相关 PSK 解调器或者不相关 PSK 解调器。对单用户而言，接收端接收到的扩频信号可以表示为

$$s_{ss}(t)=\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}m(t)\ p(t)\ \cos(2\pi f_c t+\theta) \tag{2-28}$$

式中，$m(t)$ 为数据序列；$p(t)$ 为伪噪声扩频序列；$f_c$ 为载频；$\theta$ 为载波信号在 $t=0$ 时刻的相位。

图 2-33 给出了一个 DSSS 接收机框图。假设接收端已经实现了时钟同步，接收到的信号先经过宽带滤波器，再乘以本地产生的伪噪声序列码 $p(t)$，$p(t)=\pm1$，则 $p^2(t)=1$，这样便产生了进入解调器之前的信号 $s(t)$，具体表示为

$$s_1(t)=\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}m(t)\cos(2\pi f_c t+\theta) \tag{2-29}$$

由于 $s_1(t)$ 具有 BPSK 信号的形式，因此再通过简单的解调便能得到 $m(t)$。

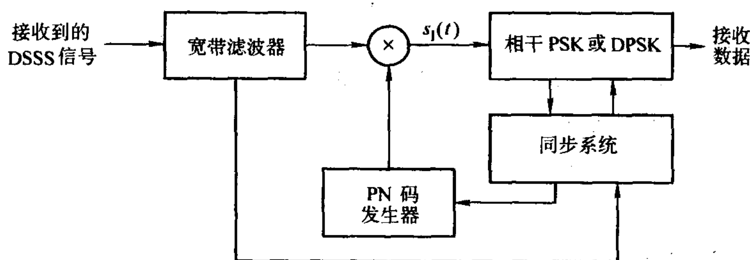



图 2-33 采用二进制 PM 的 DSSS 接收机框图

图 2-34a 给出了接收机宽带滤波器输出的扩频信号及对应干扰的频谱图。图 2-34b 给出了解调器输入端乘以扩频信号后的解扩信号频谱图。信号带宽缩减为

$B$，而干扰信号能量分布在整个 BF 频带 $B_{ss}$上。解调器中的滤波器功能是在对原数据信号影响很小的情况下去掉干扰信号的大部分能量。对干扰受限的容量的近似测试类似于处理增益，它被定义为 $PG = B_{ss}/B$。

$$PG = \frac{B_{ss}}{B} \tag{2-30}$$

系统的处理增益越大，对带内干扰的消除能力就越强。

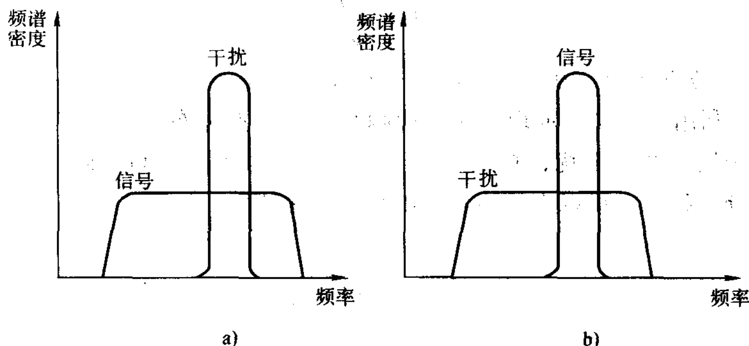



图 2-34 接收信号的频谱图

a）宽带滤波器输出 b）相关器输出

图 2-35 给出了具有 $K$ 路接入地址的 DSSS 系统。假设每路用户使用一个长为 $N$ 的伪噪声序列，码片周期为 $T_c$，则符号周期为 $NT_c = T$。第 $k$ 个用户的发送信号可以表示为

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} m_k(t) p_k(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_k) \tag{2-31}$$

式中，$p_k(t)$ 为第 $k$ 个用户所使用的伪噪声码；$m_k(t)$ 为其对应的数据序列。

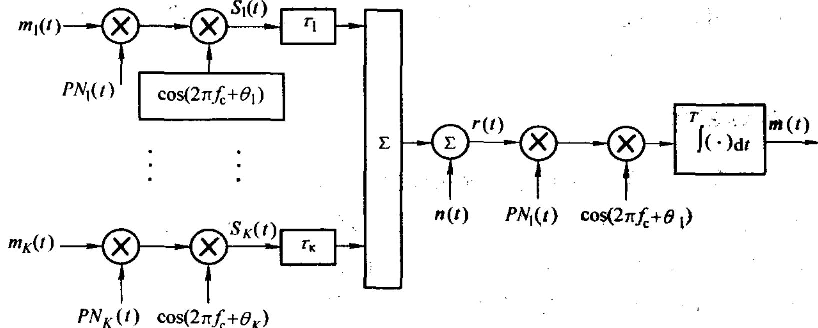



图 2-35 多用户 DSSS 原理框图

接收端若要成功地接收信号，必须对接收信号进行相关处理，并使用特征标记序列来产生判决变量等。对于用户 1，判决变量可以由下式表示：

$$Z_i = \int_{(i-1)T+\tau_1}^{iT+\tau_1} r(t)p_1(t-\tau_1)\cos[2\pi f_c(t-\tau_1+\theta_1)]\mathrm{d}t \tag{2-32}$$

判决变量中包含多径干扰 $I_k$，它是由第 $k$ 个用户产生的，还有0均值的高斯噪声变量 $E$，这些变量可以表示为

$$I_k = \int_0^T s_k(t-\tau_k)p_1(t)\cos(2\pi f_c t)\mathrm{d}t \tag{2-33}$$

$$E = \frac{N_0 T}{4} \tag{2-34}$$

假设 $I_k$ 是 $N$ 个码片在用户 $k$ 的一个比特上影响的叠加，这里一个比特持续时间为 $T$。利用中心极限定理，这些影响趋向于高斯分布。因为有 $k-1$ 个用户同时对一个用户产生干扰，总的多址干扰可以近似为一个高斯随机分布。通过利用高斯分布特性，可以方便地表示出平均误比特率，如下式所示：

$$P_e = Q\left(\frac{1}{\sqrt{\frac{k-1}{3N}+\frac{N_0}{2E_b}}}\right) \tag{2-35}$$

对于单个用户而言，在干扰取极限的情况下，热噪声因子可以忽略不计，$N_0/E_b$ 趋于0，因此表达式简化为

$$P_e = Q\sqrt{\frac{3N}{k-1}} \tag{2-36}$$

这个表达式给出了由于多址接入带来的峰值误比特率，该值是无法消除的。这里假设了所有用户的干扰功率相同，且与目标用户的接收功率相同。实际应用中，远-近效应给 DSSS 系统带来了很多问题。离基站很近的用户发送的信号将会在基站的接收信号中占绝对优势，以致影响了前面所假设的高斯分布的正确性。对许多用户来说，误比特率的限制主要是由多址干扰造成的，而非热噪声造成。

### 2.6.2 跳频扩频

跳频是指在一个给定的频带内周期性地改变传送频率。一个跳频序列可以看成是已调制数据信号在时间上以伪随机的方式选用载波频率。跳频是在一个包含着多个信道集的频带上实现的，每个信道对应于一个频点。这些可能被使用的载频集称为跳频集。在跳频集中，每个信道被定义为一个具有中心频点的，且其带宽足够包含所有窄带突发信号功率的一个频谱域。在跳频集中，一个信道所使用的带宽称为瞬时带宽。跳频发生时的频谱带宽称为跳跃带宽。发送数据时，发送机载频可以使用类似随机的方式进行跳变。这种跳变方式只有目标接收机知道。在每个信道上，小突发数据仍然采用传统的窄带调制方式进行调

制，并在发射机发生跳频之前将信号发送出去。

若每次跳频都只使用单载频时，对应的数字信号调制称为单信道调制。图 2-36 为单信道 FHSS 系统。两次跳频之间的持续时间称为跳频延迟或跳频周期。总的跳频带宽为 $B_{ss}$，瞬时带宽为 $B$，对应的系统处理增益为 $B_{ss}/B$。

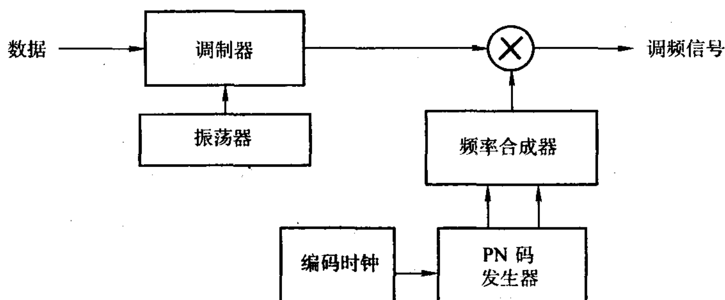



图 2-36 跳频发射端原理框图

在接收端，如图 2-37 所示，从接收到的信号中去掉跳频之后，得到的信号称为解跳频信号。在解调之前，先将解跳频的信号应用于传统接收机。由接收器得到的频率图样要同步于接收信号的频率图样。混合器的输出是一个固定在不同频率上的解跳频信号。当输入信号中有一个不期望的信号占用了一个对应的跳频信道时，信道中的噪声和干扰将从对应的频率中解跳频出来，并进入解调器。由此可见，跳频系统可能会出现碰撞，当非目标用户与目标用户使用相同信道进行传送数据时，这一情况便会发生。

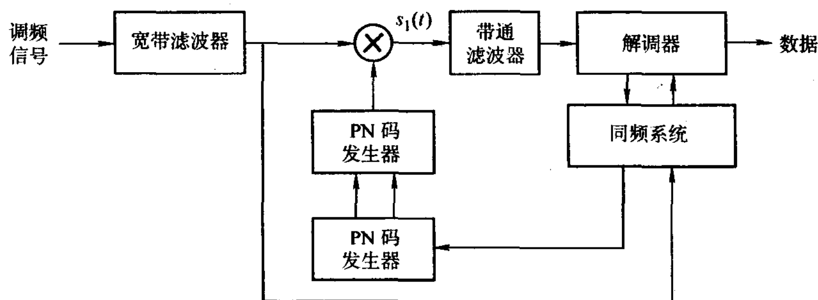



图 2-37 跳频接收机原理框图

如果使用二进制 FSK，则要对应一对瞬时频率，且它们在每一次跳频时都要改变。传输信号所占用的频率信道称为传输信道。当信号传输时，可能被占用的信道称为补充信道。FHSS 系统中的跳频速率是由接收机合成器的频率灵敏度、传输信号类型、为了避免碰撞而使用的冗余编码数、可能产生干扰的最小距离等因素决定。

在 FHSS 系统中，若使用二进制 FSK 调制，几个用户可以独立地进行跳频。如果某两个用户同时使用相同的频带，则对应的误比特率可以表示为

$$P_e = \frac{1}{2}\exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \tag{2-37}$$

通过对错误进行分析可以引申出多种跳频方案，如同步跳频（也称为时隙化跳频），为了获得多址干扰引起的不可消除的错误比例而采用的用户异步操作，以及其他详细的分析等。

与 DSSS 相比，FHSS 具有的优点是它对远-近效应问题没那么敏感。由于不同用户的信号并不总是同时使用相同的频率，信号间的相对功率大小并不像在 DSSS 中那么关键。然而，还是有可能出现远-近效应问题。由于滤波器性能不理想，临近信道中较强信号的功率可能会泄漏到弱信号所在的信道中，这样将对弱信号产生较大的干扰。这种干扰具有偶然性，为了克服这种情况，发送的信号要求采用错误纠正码。通过使用错误纠正码（如 R-S 码），系统性能可以得到较大的提高。

### 2.6.3 多路接入技术

采用多路接入方案是为了使多个用户同时享用有限的无线频率资源。为了使有用带宽可以承载更高的容量，共享是必不可少的。例如，在无线通信系统中，可以实现用户在给基站发送信号的同时也能够接收来自基站的信号。这可以通过双工技术来实现，对应的双工技术可以是频域或时域的。

多路接入技术的系统可以分为窄带系统和宽带系统，这主要由用户所分配到的带宽多少决定。窄带系统和宽带系统都能支持频分双工（FDD）和时分双工（TDD）等双工技术。

窄带系统是用于描述一个信道的带宽与信道的相关带宽的相对关系。在一个窄带多路接入系统中，可用的带宽被分为许多窄带信道，这些信道常用 FDD 方式进行操作。当使用一般的双工器和普通的发送接收天线单元时，为了最小化前向和反向链路上的干扰，频谱中应存在足够大的频率间隔。

宽带系统中单信道的传送带宽比信道相干带宽要大得多。正因如此，多径衰落对接收信号功率的影响相对较小。而频率选择性衰落也只是在信道频带的小部分频点上发生。宽带多址通信系统允许多个发射机在相同的信道上同时发送信号。

FDD 要提供两个不同的频带：一个作为发射机的发送信道；另一个作为接收机的接收信道（见图 2-38a）。FDD 中使用独立的发送天线和接收天线来提供这两种不同的信道。但是，在某些情况下，双工机可以只使用单根天线来同时进行发送和接收。为了更好地实现 FDD，有必要在发射频率和接收频率之间以

5% 的射频频率作为间隔，以便提供足够大的隔离。

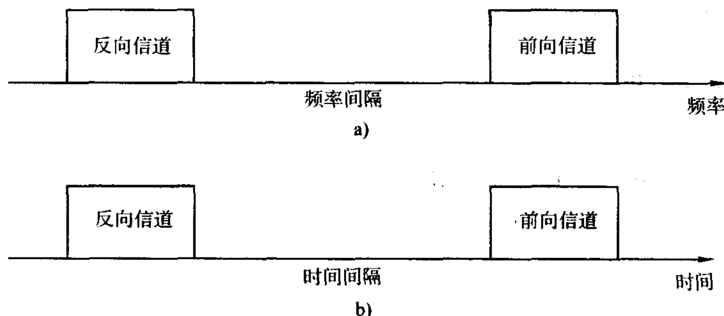



图 2-38　FDD 与 TDD 双工机

在 FDD 中，用一对具有固定频率间隔的单向信道定义系统的无线信道，这对信道称为用于发送的前向信道和用于接收的反向信道。FDD 主要应用在模拟通信系统中。在 FDD 中，任何一个双工信道实际上均由两个单方向的信道组成，并且前向信道与反向信道之间的频率间隔是固定的。

TDD 是采用两个不同的时隙来代替不同的频段，并以此来区分前向和反向链路。在 TDD 中，多用户共享一段单一的频段，并且在时域上轮流传输各自的信息。由于前向链路和反向链路共享一个频段，所以在时域上，一部分时隙被分配用来发送信息，而另一部分被分配用来接收信息。每个双工的信道都至少含有一个前向时隙和一个反向时隙，以此来保证双向信息的传输。如果数据发送速率远高于用户端接收速率，那么可能会将信息序列储存，并且表现出一种全双工的传输方式，尽管两个方向上并没有同时传输数据。TDD 只能被应用在数字通信系统中，并且它对时间同步很敏感。TDD 被应用在室内和小范围的无线通信网络中，物理上的覆盖范围比较小。

TDD 与 FDD 相比，有以下优缺点。TDD 使得每个无线电收发机可在同一个频段上既可以作为发射机，也可以作为接收机。它避免了前向信道与反向信道之间频道上的区分。而采用 TDD 方式，则会存在由于其并不是全双工方式而造成的时延，并且这种时延对个人用户的传输时延会非常敏感。由于对时间同步的要求十分严格，TDD 一般被限定在小范围接入上使用。当所有用户都静止时，对于固定无线接入，TDD 是非常有效的，因为此情况下用户之间的传输时延是相对不变的。另一方面，FDD 是与射频系统相联系的，每个用户都将会分配一个指定的频段进行信息传输。因为每个收发器同时发送和接收射频信号，所以前向和反向信道的设定必须考虑到整个系统和带外覆盖相同频谱的用户。另外，频谱间隔的设定还要考虑射频设备的成本。

近些年来，一些新的并且更有效的多路接入技术相继出现。在当前被广泛应用的有以下技术：FDMA（频分多址）、TDMA（时分多址）、SSMA（扩频多

址）、CDMA（码分多址）、FHMA（跳频多址）、HSSMA（混合扩频多址）、SD-MA（空分多址）、CSMA（载波监听多路接入）。

## 2.6.4 频分多址

FDMA为每个独立的用户分配独立的信道（见图2-39）。而信道的分配依赖于用户的服务请求。根据请求，用户可以分配到一对前向和反向的信道频段。一旦分配好之后，其他用户在其传输的过程中不能与其共享同一个信道。

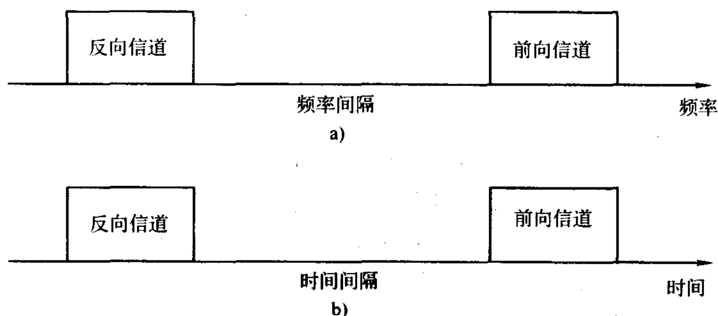



图2-39 FDMA中信道与频率分配

FDMA要求射频滤波器将相临信道的干扰最小化。另外，如果一个信道未被使用，则可以被称为空闲的，但空闲信道是不能被已经分配信道的用户再利用以提高容量。但FDD可以用来提高容量。而这样的系统被称为FDMA/FDD系统。

## 2.6.5 时分多址

在TDMA中，每个用户占用一个循环的重复时隙，如图2-40所示。这可以看成是由$N$个重复出现的时隙组成的帧结构。TDMA系统采用一种缓冲-突发（buffer-and-burst）方式来发送数据。在这种方式下，每个用户的数据都是不连续的。FDMA系统可以使用模拟FM，与FDMA系统不同，TDMA必须应用在数字调制系统中。

来自不同用户的传输序列在不断重复的帧结构中被轮流传输，如图2-41所示。每一帧均由下面几个部分组成：帧头（preamble）、信息部分、帧尾（trail bits）。帧头包括地址和同步信息，这些信息用来使基站等相互识别。保护间隔时间用来使接收器在各个时隙及帧间保持同步。不同的TDMA无线标准指定了不同的帧结构。

在TDMA系统中，每帧中所包含的时隙数目取决于调制采用的技术和带宽。由于TDMA信道的数据传输速率通常要高于FDMA信道，所以通常必须采用自适应均衡技术。此外，时间同步的要求很高。TDMA系统的传输是时隙化的，这

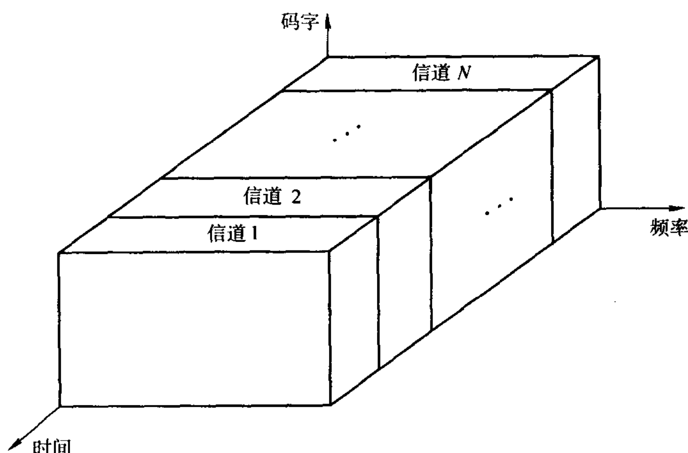



图 2-40 TDMA 中信道与时隙分配

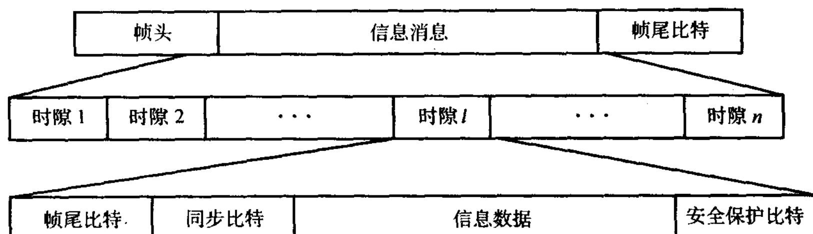



图 2-41 TDMA 帧结构

样就要求接收机与每个数据脉冲都保持同步。保护时间间隔应该最小化，但缩小保护间隔可能会引起相临信道之间的干扰。

一个 TDMA 系统的效率是载有有用信息的传输数据去掉接入方案所需的额外数据所占的百分比。帧效率定义为每帧中包含数据信息的比特数所占的百分比，如下式：

$$N_f = \left(1 - \frac{b_{oh}}{b_T}\right) \times 100 \tag{2-38}$$

式中，$b_{oh}$为每帧中的额外比特数；$b_T$ 为每帧包含的全部比特数。

每帧中的额外比特数为：

$$b_{oh} = N_r b_r + N_t b_p + N_t b_g + N_r b_g \tag{2-39}$$

式中，$N_r$ 为每帧中参考脉冲的数量；$N_t$ 为突发业务的数量；$b_r$ 为每个参考脉冲中包含的额外比特数量；$b_p$ 为每帧头中每时隙所包含的额外比特数量；$b_g$ 为每个保护间隔含相同比特的数量。

$b_T$ 可以表示为

$$b_T = T_f R \tag{2-40}$$

式中，$T_f$ 为帧长度；$R$ 为信道的比特率。

TDMA 既可以应用在窄带系统中，也可以应用在宽带系统中。窄带 TDMA 允许用户共用一段相同的频带，但必须给每个用户分配一个单独的时隙。对于窄带 TDMA 系统，可以有很多频段使用 FDD 或 TDD 双工方式。这样的系统称为 TDMA/FDD 或 TDMA/TDD 接入系统。

在 TDMA/TDD 中，帧信息中的一半时隙被用作前向信道，另一半被用作反向信道。在 TDMA/FDD 中，前向与反向传输使用相同或相近的帧结构，而两者的载频不同。一般来说，TDMA/FDD 系统会专门在前向与反向时隙间保留几个时隙，供不采用双工方式的用户使用。

在宽带系统中，TDMA 给在同一信道的许多发送器分配时隙，而在一个时刻只有一个发送器接入到信道。相比较而言，扩频 CDMA 技术可以使所有的发送器同时接入信道。TDMA 与 CDMA 系统均可以使用 FDD 和 TDD 双工方式。

### 2.6.6 扩频多址

SSMA 技术使信号的传输带宽远大于最小所需带宽。一种伪随机序列在传输前将窄带信号转化成宽带的伪噪声信号。同时，SSMA 可以提高抗多径干扰的能力。由于大量的用户可以共享同一个系统，所以 SSMA 的带宽效率很高并且应用在许多无线通信系统中。

两种主要的 SSMA 技术分别为 FHMA 和 SDMA，SSMA 也被称为 CDMA。

### 2.6.7 码分多址

在 CDMA 系统中，窄带信号被转化成一个带宽很宽的信号，即扩频信号。扩频信号是一种伪随机编码序列，这种伪随机编码的码片速率远大于信息数据的比特速率。如图 2-42 所示，一个 CDMA 系统中的所有用户使用相同的载频并且可以同时传输。每个用户拥有自己的伪随机序列，该序列与其他用户的伪随机序列近似正交。接收机使用时间相关器来检测所需的特定序列。由于不相关，所以其他的信号对于有用信号来说均为噪声。为了进行信号检测，接收机必须知道发送机的序列。每个用户都是相互独立的，并不会知道其他用户的序列。

在 CDMA 中，不相关的多用户的功率决定了噪声水平。如果对一个小区内每个用户的功率不加控制，那么在基站接收机处每个用户的功率就会不相等，这样就会造成远近效应。

远近效应出现在许多用户共享同一个信道的情况下。一般来说，在基站处功率最大的接收信号将被解调。在 CDMA 系统中，较强的接收信号功率会抬升较弱信号在基站处的解调器的噪声门限，因此较弱的信号可能不会被接收解调。为了避免这种远近效应，在大多数实际的 CDMA 系统中，都要采用功率控制技

术。功率控制是用来保证在一定的覆盖范围内来自不同用户的信号在基站接收器处的功率基本一致。通过每个用户的快速采样信号所显示的功率水平，来对上行链路进行功率控制。

在 CDMA 系统中，必须大幅度降低多径衰减，因为信号是在一个很宽的频带上进行传输的。由于信道中数据传输速率很高，所以符号宽度会很小，并且远小于信道的传输时延。

### 2.6.8 跳频多址

FHMA 是一种用户的载频在宽带信道中不断进行伪随机模式改变的数字多路接入技术。如图 2-42 所示，FHMA 可以使多个用户同时占用相同的频谱进行传输，而每个用户在一个特定时刻占用一个特定的窄带信道，而这个特定信道的选取决定于用户的伪随机编码。每个用户的数据信息被分割成标准的数据脉冲长度，这些数据脉冲将会在分配频带的不同信道上进行传输。每个突发脉冲的带宽远小于总的传输带宽。在任何一个给定的时间内，用户载频的伪随机变化实际上是随机地改变了特定的传输信道，因此这样可以使多个用户接入到一个很宽的频带内。在接收端一侧，本地伪随机码发生器用来对接收信号的即时频率进行同步。在任何一个给定的时间内，跳频信号只占用一个窄带信道，同时窄带 FM 和 FSK 被广泛应用在这种技术中。

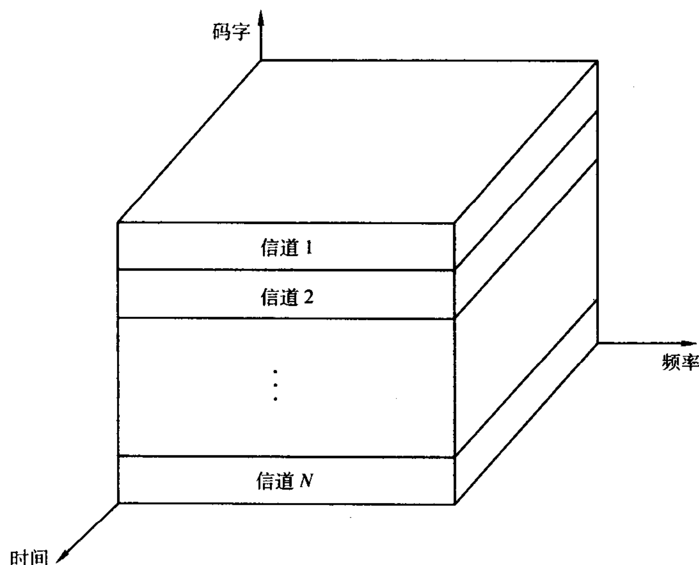



图 2-42　扩频多址 CDMA

FHMA 与传统的 FDMA 的不同之处：跳频信号在极短的时间间隔内就会改

变其传输信道。如果载频的改变速率高于数据的符号速率，那么这种系统可以称为快速跳频系统。如果载频的改变速率小于或等于符号速率，那么称为慢速跳频系统。快速跳频系统可以看作是应用了频率分集的 FDMA 系统。FHMA 系统经常采用能量效率恒包络调制。

跳频系统提供一种安全保证，当大量的信道被使用时，一个监听接收器不可能马上知道载频的伪随机跳频序列，所以它必须快速进行调整来跟踪它想监听的信号。另外，跳频信号有较好的抗衰减能力，因为错误控制编码和插入码可以有效地减少深衰落对跳频信号的影响。当两个或多个用户同时在同一个信道上传输数据时，错误控制编码和插入码可以避免信号相互抵消的情况产生。由于 FHMA 具有较高的功率效率和较低的设备成本，所以它在蓝牙和家用无线射频技术中有应用。

## 2.6.9 混合扩频技术

除了跳频与直接 SSMA 技术以外，还有几种混合的多路接入技术具有更多的优点。

混合 FDMA/CDMA（FSDMA）技术被用来代替直接序列 CDMA（DS-CDMA）技术，如图 2-43 所示。可用的频谱带宽被分割成几个子频段。每个子信道都是一个窄带 CDMA 系统，而这个窄带 CDMA 系统拥有比传统 CDMA 系统更高的处理增益。这个混合系统的优点是不同用户可以根据业务的不同被分配到不同的子频段上。

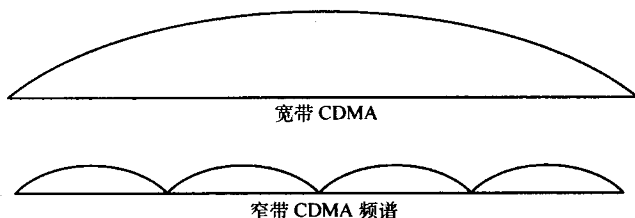



图 2-43 宽带 CDMA 与混合窄带 CDMA 的频谱

混合 DS-FHMA 技术由一个直接扩频信号组成，而这个信号的中心频率是伪随机跳频的，如图 2-44 所示。直接扩频跳频系统的优点在于它可以防止远近效应的产生。然而，这种系统不容易进行同步。

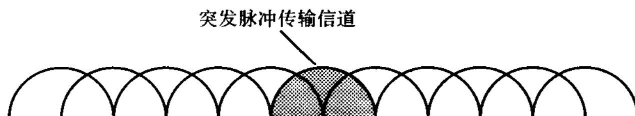



图 2-44 混合 DS-FDMA 系统频谱

时分CDMA（TCDMA）或TDMA/CDMA系统对不同小区采用不同的扩频码。在每个小区内，为每个用户分配一个特定的时隙。这样，在一个小区内，在任何时刻都只有一个CDMA用户可以进行信息传输。这种方法可以消除远近效应。

时分跳频（TDFH）是一种在一个新的TDMA帧开始时进行跳频的多路接入技术。这种技术经常被应用在多径效应十分严重或同频干扰很严重的情况下。

### 2.6.10 空分多址

SDMA可以通过定向波束控制向每个用户发送信号辐射能量（见图2-45)。这种技术可以与TDMA与CDMA一样使不同方向上的信号频率相同，也可以与FDMA一样使不同方向上的信号频率不同。深入的研究集中在自适应天线上，它可以使不同方向上的用户及时地改变发射功率。基站处自适应天线的应用可以解决某些下行链路上的问题。在波束带宽可以无限小以及跟踪可以无限快的条件下，自适应天线可以将SDMA最优化，从而提供一种可以完全避免与小区中其他用户发生干扰的理想信道。使用SDMA，系统中的所有用户可以在同一信道上同时传输信息。然而，理想的自适应天线暂时是不存在的，但理想的方向性阵列天线是存在的。

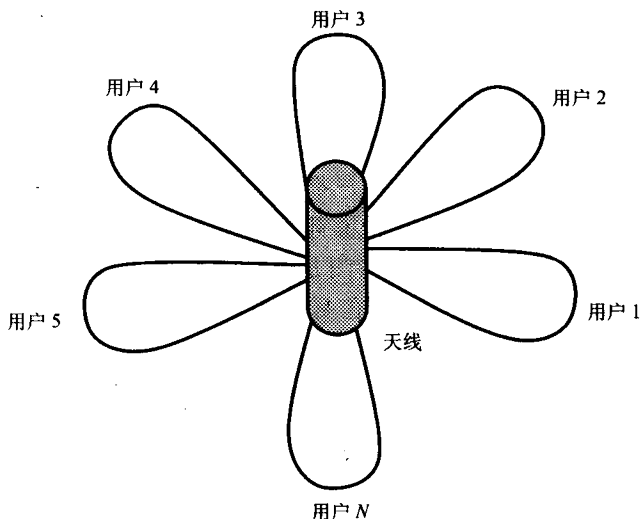



图2-45 SDMA天线

### 2.6.11 载波监听多路接入

CSMA协议基于网络中的每个终端在发送信息之前都可以监控到每个信道的特性。如果信道是空闲的，用户就可以通过网络中所有发送器均采用的特殊算

法来发送信息包（packet）。

在 CSMA 协议中，监测时延与传输时延是两个非常重要的参数。监测时延是终端用来检测信道是否是空闲所需的时间，并且由接收器的硬件决定。传输时延是对信号从基站到移动终端所需时间的相对估计。如果监测时延比较小，意味着终端可以快速监测到空闲信道。而较小的传输时延，意味着与信息包本身的持续时间相比，信息包经过信道传输所花费的时间比较少。

下面有几种不同的 CSMA：

- 1-持续 CSMA：终端持续监听信道，等待信息的传输，直到找到空闲信道。一旦找到空闲信道，发送器就会发送信息。
- 非持续 CSMA：在接收到一个未应答（NACK）信号后，终端会等待一段不定长时间，然后进行再次传输。这项技术被广泛应用在无线本地网络中。
- P-持续 CSMA：应用在划分时隙的信道。当监测到空闲信道时，将在第一个可用时隙上传输信息包。
- CSMA/CD：在 CSMA 中使用冲突检测技术，用户在传输时进行冲突检测。如果两个或多个终端同时开始进行数据传输，被检测到的传输将立即中断。
- 数据监听多址接入（DSMA）：CSMA 中特殊的一种接入方式。发送器首先解调上行控制信道，之后再在下行信道中广播数据。每个用户都尝试去检测一个忙-闲信息。当忙-闲信息标明没有用户在下行信道上进行信息传输时，用户就可以进行信息包的发送。

### 2.6.12 分组无线

在分组无线接入技术中，许多用户都可以接入到一个单一的信道中，而相互之间并不协同。每个用户的信息传输都是由突发脉冲完成的。多用户的同时传输在基站的接收器处检测，这种检测是通过向请求发送器发送应答（ACK）或未应答（NACK）信号完成。ACK 信号表明从特定用户发送来的信息已被成功接收，而 NACK 信号表明先前的信息并没有被基站准确接收。通过使用 ACK 和 NACK 信号，一个分组无线系统可以保持有效的反馈，尽管可能会造成交换时延而导致冲突产生。

分组无线多址接入运行起来相对容易，但是频谱利用率较低，并且可能造成严重的时延。用户使用竞争技术在一条公共信道上进行传输。分组无线系统中有许多协议来进行协同。例如，为早期的卫星系统定制的 ALOHA 协议，就是一个较好的处理竞争与冲突的例子。ALOHA 允许每个用户在任何时间发送信息。而正在发送信息的用户同时可对认可反馈进行监听，以此来判断传输是否成功。如果产生冲突，那么用户将会等待一段不定长的时间，之后再次发送信息。分组无线技术的优点是其可以无限制地接入用户。

## 2.7 小结

本章首先讨论了现代通信系统的基本概念，并对电磁波传播的基本模型进行了讲解。当电磁波传播时，可能会发生损耗、衰落、反射、折射和衰减等。本章简要介绍了射频通信系统的必要组成部分；详细说明了数字通信系统的基本要素；并且详尽讨论了现代通信方法，解调和多路技术，扩频技术，以及多路接入方法。

# 第3章　数据传输、网络、协议和标准

硬件与软件资源的联网是各种设备共同工作的基础。联网通过信息的交换、任务的协同操作、设备的功能共享来提高效率。网络通过一种通信媒介，在适当的软件支持下，将相互作用的设备进行有效的连接。软件可以应用于整个系统或其中的某个功能模块。一个系统由相互联系的单元组成，这种相互联系保证了协同工作的效率，促进了应用的整体性，并且共享了彼此的资源。

将设备连接起来构成网络的概念已经广泛应用了几十年。在早期网络中，几乎所有相互通信的设备都是有线连接的，这就造成了网络在空间上的局限性。现代网络中的设备可以通过无线通信技术进行连接。无线技术的应用在并不改变原有网络的基础上建立了空间上的移动性。因此，现代网络可以看成是：设备之间有线连接并在空间中是固定的，称为有线通信网络；设备之间无线连接并在空间中可移动的，称为无线通信网络；同时使用上述两种不同技术的网络，称为混合网络。当今，基于无线技术的移动网络主要提供语音业务，但移动网络正日益运用数字和其他形式的信息。无线通信网络可以提供与固定网络所能提供的相近的服务，除此以外无线通信网络还拥有降低初步建网与维护的成本等优点。

有线与无线通信网络之间存在很多共同点。无线通信网络是在现有网络技术的基础上构建的，即可以充分利用过去所积累的知识。

本章首先讲解网络的基本组成部分和信息的传输，同时还讨论了有线和无线通信网络的拓扑结构。接着详细介绍与无线通信网络相关的各种标准和协议，因为它们是不同设备相互作用的基本保障。本章着重强调了无线通信网络中安全性的概念，并且讨论了保障安全性的相关方法。无线技术在不断地发展，于是也对频谱资源的有效使用与新出现的相关技术进行了讲解。

## 3.1　数据传输

数据是指字母、数字或者特殊的符号。将这些数据进行适当的二进制编码，组成文字、消息或者信息。数据通信主要是指将数据从一个地方的设备发送到其他地方的设备上。两个或多个设备彼此通信就组成了一个系统，即这些设备连接成了网络。网络可以是有线的或无线的，也可以是混合的。

数据从一个设备发送到另一个设备的速率是用波特率或比特率来衡量。波

特率是指单位时间（一般指 1s）内发送的符号数量，而比特率是指每秒发送的比特数。当每个符号分配 1bit 时，波特率与比特率相等。但通常符号是由几个比特组成的字、串或代码。例如，对数字以及包含数字与文字的符号进行编码的 Murray 编码中，每个符号包含 5bit。

数据信息通常以数据帧的形式进行传输。一个数据帧由几个字符串连起来表达一个完整的消息，这种消息可以被发送设备和接收设备所理解。图 3-1 表示了一种典型的数据帧。当使用数据帧时，信息的传输速率并不等于波特率或比特率，因为帧中还包含地址、错误检测以及帧头和帧尾这些额外数据。特殊应用中制定的协议和标准规定了数据帧中包含的信息类型。协议是在一些参考模型中设定的［例如，电器及电子工程师协会（IEEE）802 或开放系统互连（OSI）参考模型］。可以理解，实际信息的传输速率要远小于协议中引用的数据传输速率。

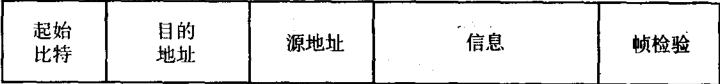



图 3-1　数据传输的帧结构

数据通信系统及相关网络依赖于如电线或光缆等物理连接的理论、协议，已经形成并应用了很多年。然而，与有线技术相比，元器件及传感器的无线数据通信及联网是相对较新的，并且具有其他特征。无线与有线通信网络的操作原理有许多共同之处，但无线通信网络正在发展成为一个独立的实体。

无论在无线还是有线通信网络中，数据均可以并行或串行传输，同步或异步传输，单向、半双工、全双工传输。因此，这些概念均适用于无线和有线数字通信。

### 3.1.1　串行和并行数字通信

数据可以以串行或并行的方式从一个设备传送到另一个设备。在串行数据传输中，一个编码中的每个比特是连续发送的，如图 3-2 所示。所以，串行传输只需要用一对链路将发送器与接收器相连。在并行数据传输中，一个编码中的所有比特或部分比特可以同时发送。因此，所需链路数是同时发送比特数和接收比特数之和。例如，一个 8bit 的编码至少需要 8 个并行链路将发送器与接收器相连，如图 3-3 所示。

### 3.1.2　同步和异步传输

串行数据可以通过同步和异步两种不同的形式进行传输。异步传输是将信息分割成块。这种形式的通信可以在块与块之间留有足够的空闲时间，并经常

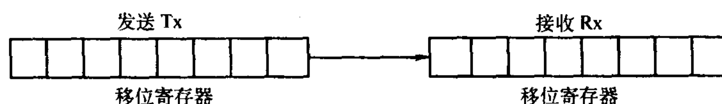



图 3-2 串行数据传输

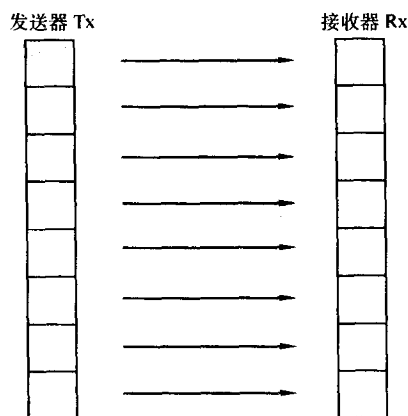



图 3-3 并行数据传输

应用在不需要高速数据传输的情况下。异步数字传输使用的数据包括同步处理的信息，数据的属性与长度，以及数据块的开始与结尾比特，这样接收器就可以得到发送器传输信息的特性。由于接收器知道数据块的开始与结尾比特，所以数据块可以在任何时刻以任何速率发送。通过使用开始与结尾比特，发送器与接收器之间的每个信息块均是自身同步的。块本身的数据长度和块之间的时间间隔经常是不固定的，主要取决于每次的同步原理。实际上，由于额外同步的需要，异步传输要比同步传输慢。

图 3-4 说明了一种典型的二进制数据是如何进行异步传输的。当数据被发送时，首先传输一个起始比特（二进制 0），随后传输任一奇偶校验位或更多的结尾位，结尾比特一般是一个标志或一个 1。

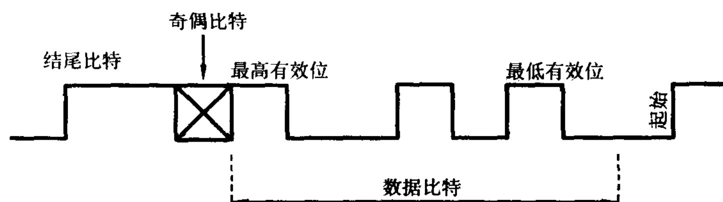



图 3-4 串行数据的异步传输

在异步传输中，接收器可以通过高电平到低电平的转换检测到起始比特，再对它之后的 7bit 进行解码。如果有更多的数据要传输，那么上述过程将被不断重复。接收器与发送器各自均有内部时钟，时钟的前进速率是一致的，但是两者之间并不同步。并且，异步传输系统允许发送字符间的间隔是可变的。

同步传输是一种基于消息的传输技术；与异步传输不同，它并不需要起始和结尾比特。它需要接收端和发送端采用相同的时钟来达到同步。这样有助于

字符脉冲的识别。接收器可以识别接收数据流中的一种特殊编码。这种编码允许接收机锁定到达的比特流。接收器必须与发送器完全保持同步。这种时钟的同步可以看成是比特同步。同步传输的特性如下：

- 每个信息块并不需要起始和结尾比特来进行同步；
- 发送器与接收器之间传输的每个比特都要与共同时钟保持同步；
- 数据通过数据块传输，而每块之间没有间隔；
- 整个数据块使用标明起始与结尾的编码来构成一个帧；
- 接收器必须知道编码方案、块长度以及其他相关的控制信息；
- 由于已经进行了同步，所以同步传输对传输波形的失真并不敏感。

在同步传输中，同步是针对消息而不是针对信息块的。一旦同步，信息块之间就不允许有停顿或间隔。当设备不需要进行连续信息传输时，或者其在不能维持连续传输的情况下不具有保存全部消息的能力时，这种传输方式的有效性就会降低。

同步和异步传输是通过一些专用设备进行的，例如通用同步-异步收发器（USART）、通用异步收发器（UART）。USART 与 UART 是串行数字通信中的重要组成部分。USART 可以将并行比特转换成连续的串行数据流。USART 可以是同步的，也可以是异步的。UART 可以进行异步串行通信。一种典型的 UART 是有 40 个插槽的可编程设备，它可以在半双工或全双工方式下发送或接收异步数据信息。UART 可以接收并行数据并将其转换成异步模式下的串行信息等待传输。

### 3.1.3 单工、半双工、全双工数据传输

两个设备之间的数据传输可以是单向的、半双工的或全双工的，如图 3-5 所示。单向传输意味着传输只能从一个设备到另一个设备。在这种模式下，一个设备在任何时刻只能发送不能接收，或者只能接收不能发送。半双工传输意味着传输可以是双向的，但是任一时刻只有一个方向在进行传输。全双工意味着传输可以在两个方向同时进行。

在许多设备同时进行通信的网络中，传输会使用多个信道。信道定义为信号经过链路的一个独立路径。链路可以定义为将通信中的终端相连接的全部组成部分。

寻呼系统采用单工模式。在寻呼中，消息只是被接收但不需要确认。对讲机采用半双工模式。在对讲机系统中，用户按下按钮即可说话，而放开按钮即可接听。这两种模式都不能同时通信。全双工系统可以通过使用 FDD 或 TDD 技术提供同时但独立的信道。FDD 使用不同频率信道，而 TDD 使用同一信道上的相邻时隙。

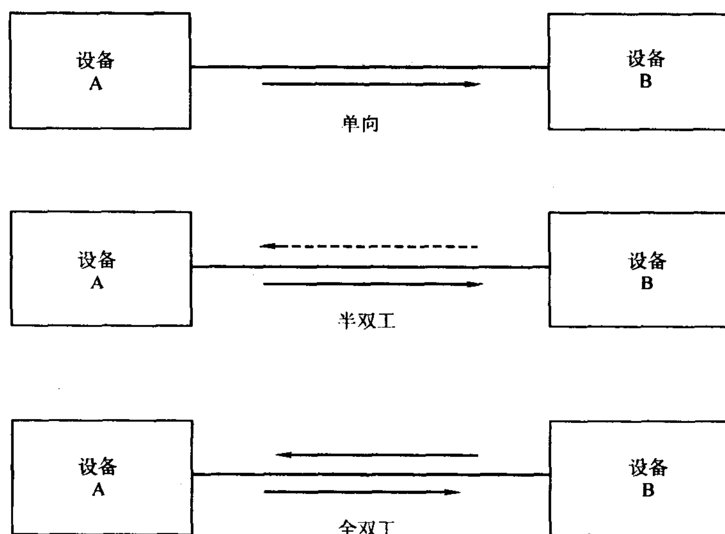



图 3-5 三种信道工作模式

### 3.1.4 无线数据传输

设备可以通过有线或无线的连接构成局域网（LAN）来进行通信。大多数局域网中的无线通信设备与有线设备一样进行通信，只是它们使用空间作为传输媒介。有线和无线通信网络的运行原理十分相似：对于发送和接收设备必须要有一个网络接口。在无线通信网络中，这种接口一般是射频收发信机，而不是电缆。在许多情况下，有线和无线通信系统混合匹配使用。如果要将无线通信系统接入到有线通信网络中，必须用接口设备将两者连接起来。这样就可以提供有线和无线通信设备之间的相互通信。

在无线通信系统中，传输频率影响可以传输的数据量和传输速度。传输信号的强度或功率决定了在保证无差错和无毁坏的情况下的传输距离。一般来说，理论上信道的频率越低，传输速度就越慢，可传输的信息量就越小，但传输距离会越长。尽管更高的频率可以保证以更高的速率传输更多的数据，但有效传输距离却变短了。

现代无线通信系统使用电磁频谱的中间部分。电磁频谱的中间部分可以根据不同的通信目的被划分成几个频段。这些频段分别为：无线电频段（10kHz～1GHz）、微波频段（1～500GHz）、可见光与红外线频段（500GHz～1THz）。

### 3.1.5 无线电频段数据传输

用电磁波传输数据的频率和距离成反比关系。另外，频率、数据传输速率

与带宽之间也有直接关系。在数据传输中，无线通信网络会使用三个主要的频段：RF（窄带、扩频、宽带），可见光与激光，微波。

在短距离或长距离传输中，无线电通信系统可以被设计成窄带、扩频或宽带的系统。然而，这些频带的使用以及在此频带上的发射信号功率是被严格规定的。在美国，政府机构［例如联邦电信委员会（FCC）］对几乎所有的无线电频段进行管理。任何商业或政府的组织在使用某一特殊频段时都必须通过 FCC 的批准。同时还限定了发射信号的最大功率。此外，FCC 还设定了在一定功率限定下可以自由使用的频段。这种不受管理的频段是 902 ~ 928MHz、2.4GHz 与 5.72 ~ 5.85GHz，而在这些频段上允许广播的最大距离为 70m。

窄带无线电或单频无线电系统采用低功率双向无线通信系统，双工方式为半双工。出租车或基站之间的无线电就采用这种系统。在这些系统中，接收机与发射机必须设定到一个特定的频率来接收或发送呼叫。有些单频系统具有较高的功率级别。这种类型的系统经常用于远距离传输，并且使用中继器及信号跳变技术来增大传输距离。

扩频无线电系统解决了高功率与低功率单频通信系统的几个问题。扩频使得多频段同时传输，因此改进了对单一频率的依赖性，并且提高了抗干扰能力。多频段使得数据窃听变得更加困难。

扩频系统的两种类型为跳频与直接序列扩频调制。跳频是在规定的时间间隔内改变数据的传输频率。发送器与接收器必须小心地保持同步来维持通信。在许多系统中，硬件决定了跳频时间和传输频率的选择。

直接序列扩频调制将数据分割成固定大小的码片，并将数据在几个不同频率上同时传输。接收设备可以识别出哪些频率上载有数据信息。一旦从此频率上获得数据，接收器就将得到的码片重新组织成原来发送的信息序列。出于安全目的，一些系统在一个或多个信道上发送假数据，而在另一个信道上发送真实数据，这使得窃听更为困难。

### 3.1.6 红外数据传输

红外无线发送器采用红外频段的光束在终端间进行信息传输。红外发送器产生可以抵御其他光源干扰的强信号。由于其具有较高频率，所以这种通信系统的工作性能很好。这种系统的数据传输速率可以达到 10 ~ 100Mbit/s。主要有四种类型的红外线系统：

- 可见系统需要在发送器与接收器之间有一条可见或无障碍的链路。
- 反射红外系统中的信号是由称为集线器的中间设备产生的。集线器再将信号传递给目的接收器。
- 散射红外系统通过墙壁或其他固体的反射来传递信号。反射后的信号再

被接收器采集。这种方法把传输距离限制到了30m或更短，具体距离依赖于发送信号的强度、接收器的灵敏度以及来自其他光源的干扰强度。反射技术造成了信号的时延，因此相比可见系统，散射红外线系统使用了更小的带宽。

- 宽带光电话中继站可以提供高速的宽带服务。在某些应用中，这种技术可以达到大多数现代有线通信系统所能提供的容量。

激光通信也需要发送器与接收器之间有可见链路。在许多应用中，基于激光通信技术的系统在使用上受到了限制，因为过量的辐射会对人的视力和健康造成损伤。

### 3.1.7 微波数据传输

微波数据传输是一种在全世界广泛应用的技术。然而，微波系统的造价比较昂贵。对于只用于短距离传输的小型系统而言，微波数据传输是不切实际的，但是从技术上来说是可行的。这项技术主要应用在长距离高速率传输的太空通信、电视广播以及军事与民间应用中。

## 3.2 数据流的安全性

发送器与接收器之间的安全性在所有通信系统中都是非常重要的。数据需要在没有任何其他团体造成的人为中断以及第三方造成的干扰和监听下进行传输。发送器与接收器之间的信息传递应该是可靠的，不应有任何损失、消除、附加噪声或衰落，并且不会被未授权方中断。

有几种提高信息传输可靠性的有效方法，例如信道编码、扩频、多路技术和加密。信道编码将在这一节中加以解释。扩频与多路技术已经在第2章中有所介绍。加密技术将在下一章介绍。可靠的信息流也可能会含有电磁波传播所引起的问题，比如第2章提到的多径与衰落。由于数据流的安全性包含很多技术，所以它也具有巨大的研究价值与广泛的发展空间。

无论是有线或无线用户，首要考虑的问题就是数据被第三方截获或中断的可能性有多大。公司最后想要的是被截获或危害的数据。理论上任何人使用一个合适的接收器，将其放置到合适的地点，均可以监听到其他用户的数据信息。在窄带与单频系统中，这种可能性是非常大的。如果用户将信息加密，并且使用扩频技术就可以令这种可能性大幅度降低。

### 3.2.1 信道编码

为了在设备之间成功传递信息，接收机必须能从传输中经过多次改变的接收信号中恢复出原始信号。如第2章所讨论的，用电磁波来传递信息会存在许

多负面影响，例如衰落、干扰、信道不固定、传输链路中断和附加噪声。信道编码，或者称为错误控制编码，可以通过增加冗余来有效保护信号不受外界干扰，如图3-6所示。信道编码可以通过避免数据在传输中最可能发生的错误来降低错误发生的可能性。

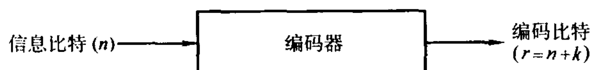



图3-6　信道编码的概念

在信道编码中，即使在传输中发生了明显的干扰，使用冗余也有助于识别原信息。引入受控的冗余来建立包含部分原始信息的子集，因此，从某种意义上说，隐藏了信息。把包含冗余部分的子集称为编码，把有效信息称为码字或码矢量。一个好的编码应包含被保护码字，这样由传输过程中干扰所引起的错误概率就会降到最低。

信道编码能够降低差错率是因为在码元序列中增加了冗余。但是，增加冗余会增加发送比特数，从 $n$ bit 增加到 $n+k$ bit。信道编码由于降低了有用信息的发送速率，从而使系统的有效性降低。在应用中，码元用 $n$ 与 $k$ 表示，码元比率为 $k/n$，数据传输速率增加了 $k/(n+k)$。然而，尽管使用信道编码可以减少错误率，但并不能保证消除所有的错误。

信道编码有两种基本类型：分组码与卷积码。分组码是将原始数据分成若干组，每 $n$ bit 为一组。编码器编码时在每组中增加了 $k$ bit 冗余，将每组数据转换成 $(n+k)$ bit。编码器也增加了关于如何增加冗余的信息，使得接收端译码器能从接收到的码元中恢复出有用信息。在众多类型纠错码中，最广为人知的是汉明码、循环冗余检测（CRC）码、BCH码、RS码和格雷码。

卷积码的编码器连续从分组中接收有用数据并用移位寄存器产生更高速率数据。尽管此方法对于错误检测有用且方便，但纠错比分组码要复杂得多。卷积码采用概率译码和最大似然译码来纠正错误。

分组码与卷积码技术能够结合起来使用，尤其是在产生突发错误的信道中。分组码与卷积码均采用交织技术，交织时将每个信息扩展到一个时间间隔中并将突发噪声的影响减少到最小。交织时将数据流分成若干行，并在每列中通过编码来查找消除错误。在这种方法中，突发错误通过纠错编码变成了随机错误，从而被当作一般错误进行处理。

一旦检测出错误，将主要采用两种纠错方法：自动重发请求（ARQ）与前向纠错（FEC）。在ARQ中，接收机要求发送机重新发送发生错误的信息部分。ARQ是一种功能强大且非常有效的技术，但它需要额外的反馈信道并会增加数据流的延迟。在FEC中，接收机在不需要求助发送机的情况下自己纠错。它利

用与数据一起发送的额外信息并采用一种或多种信道编码方法来进行纠错。

在一些通信系统中，随机错误与突发错误均是严重的且会同时发生。在这种情况下，将采用串联技术。串联使用两种类型的编码，一种用来纠正随机错误；另一种用来纠正突发错误。

### 3.2.2 加密

加密是用来保护发送信息免受未授权方的侦听与破坏。加密将原始文本编码转换为密文。在发送端，数据被加密后产生的密文是一串随机的无意义的字符流。在接收端，被加密的数据通过解密过程恢复出原始信息。加密与解密操作通常在密钥的控制下进行，密钥只有发送端与接收端知道。加密与解密过程的基本结构如图 3-7 所示。

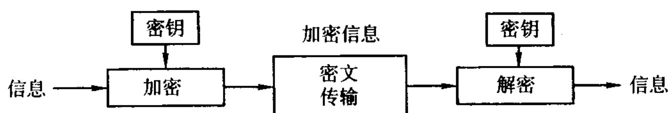



图 3-7　一个典型的加密过程

数据采用密码进行加密，对于加密数据来说，这是一个数学与物理的过程。可以通过改变产生密码的密钥来改变与修改密码。在传统密码系统中，发送端与接收端使用同一个密钥，这使得加密过程与解密过程相对称。有两种主要类型的加密方式：分组加密与流加密。

分组加密是在预定的块中加密若干位。典型的组大小是 64bit，也就是说，每 64bit 原始数据被加密后形成 64bit 密文。流加密是逐位加密，将每位原始数据都转换成密文。理想的密文应是完全随机且不可预测的。但这是不实际的，因为在传送过程中发送端与接收端密钥很难保持同步。大多数密码改为使用发送端产生的伪随机密钥流。接收端采用与发送端一样的公用密钥。使用密钥流会使得发送信息看起来是完全随机的，因此密文与原文之间实质上是一种透明的关系。

伪随机密钥流可以以许多方式产生。一种简单的产生方法是使用由一些记忆单元构成的线性移位寄存器。记忆单元构成移位寄存器，且在每个时钟周期，寄存器的记忆单元向右移动一位。移位寄存器的输出是与原始数据相异或。移位寄存器只有发送端与接收端可知，并且将数据与记忆单元相异或，所以未授权的接收端所看到的信息流是完全随机且不可恢复的。

对于理想的加密系统来说，密码分析学即原文的恢复在没有正确密钥的情况下是不可能进行的。据说这是绝对安全的。但是，惟一已知的绝对安全加密系统是一次性密钥（OTP），此系统中密钥流是完全随机且不可预测的，且只能

在发送端与接收端使用一次。这种类型的绝对安全系统在大多数应用中是不可实现的，而大多数系统目标是保证计算上安全。

对于计算上安全的系统，在信息的有效寿命期内破坏加密信息的代价是相当高的。试图破坏加密信息需要测试与接收到的组有关的每种可能的加密密钥。付出的代价举例说明如下：如果 56bit 密钥用于加密，那么加密过程中所有可能使用的密钥数将有 $2^{56}$ 种。也就是说，如果一般的计算机每秒钟能测试 $10^{10}$ 种密钥，那么要测试完所有可能的密钥将花费大约一个月时间。只破坏一个分组的密码就需要花费一个月时间，那么要想破坏长数据流的密码几乎是不可能的。依据当今计算机的运行速度，要保证长期安全需要使用 128bit 或更多位密钥。

在密钥未知的情况下，一个有效的加密系统产生的密文很难恢复成原文。理想情况下，密文结构是不可见的。因此，密钥越长，安全性就越好。在大多数情况下，无论原文还是密钥只要有较小的改变都会使密文发生很大的变化，这种现象称为雪崩效应。

在无线通信系统中，有许多种加密的算法与标准。数据加密标准（DES）是对称加密算法的一种。DES 起初是由 IBM 创造的，现已普遍应用于因特网、银行交易与有线电视中。目前，DES 被美国政府授权用于不危及国家安全的安全数据应用中。

有很多其他类型的加密技术。人们普遍使用非对称加密算法。公钥与私钥算法是两种不同的非对称加密技术。公钥算法的安全性是基于一些反转运行复杂性上的不同。RSA 算法可能是目前最流行的公钥加密系统。这种算法采用两个或更多的素数和复杂的算法来进行加密和解密。实际上，公钥算法通常用在发送端进行解密，而私钥算法用在接收端进行解密。

## 3.3　网络的基本要素和拓扑结构

网络组织软硬件元素彼此以相互协调的方式进行通信。对于有效通信，这些元素必须是相互兼容的设备。人际网是指在网络上许多用户和设备之间共享资源和交换信息。最基本的网络是由两个设备构成的，这两个设备连接在一起将信息从一端传输到另一端。尽管网络概念看起来很简单，但是网络中设备间的相互通信需要大量的协调和许多复杂的技术。此外，对网络元素与相关软件间的物理连接有很多种选择。本节对一些难点进行了讨论，以使读者对网络操作能够更加感兴趣。

网络有各种用途，包括：

- 数据共享，允许一组用户彼此周期性地或规则地交换信息；
- 从一个网络元素向另一网络元素发送数据；

- 软件资源共享，允许许多用户共享信息、文件和其他文件夹；
- 外围设备共享，允许一组用户共享一般的硬件资源；
- 不同生产环境下的设备装置之间的协调；
- 监控设备装置情况；
- 对安全问题进行监控并采取正确措施；
- 生产计划、配置、重新配置；
- 研究与开发，试运行，统一系统运行等。

计算机网络类型多种多样，根据网络元素数量与空间分布进行划分。局域网（LAN）是在一个相对局限的空间内相互连接数据通信元件的系统。局域网的覆盖范围一般是一栋楼或几栋楼，比如工业生产车间、大学、政府部门和其他组织。将局域网相互连接在一起就构成互联网，如大学与组织的不同部门之间的联网。连接两个或多个局域网可扩展成为城域网（WAN），城域网有更大的覆盖范围。在复杂的大环境中，城域网上的用户和设备数可增加到数千个或更多。例如，因特网是一种城域互联网络，它包含全世界数百万个用户与机器。有很多其他术语用于描述网络，如城域网、个人局域网（PAN）等，但这些基本上是大小不同的局域网或广域网。

网络的主要目的是通过连接称为节点的网络元素来共享资源。连接各节点有四个必需要素：传输媒质、网络拓扑、协议与网络操作系统。

传输媒质定义为网络节点间的物理路径，网络使各节点彼此相连。物理路径可以是电缆、光纤、射频设备、微波设备等。

拓扑结构是指设备的物理布局。拓扑结构与用在设备和资源共享方式间的通信方式相关联。网络拓扑结构对网络将来的发展潜力、网络的性能与效率均有重大的影响。

协议是使设备间相互通信所达成的一系列规则。简而言之，要使两设备间彼此相互通信，它们必须共享一系列规则，这些规则明确定义了它们将如何进行通信。

操作系统是在后台中运行的软件，它管理网络节点间设备与数据的共享。操作系统的重要性在于尽管两个设备享有共同的媒质与网络协议，但如果它们没有运行接入网络和通信所需的相应软件，那么它们之间仍不能相互通信。

### 3.3.1　网络软件

设备需要网络软件来发起允许它们之间相互通信的请求与应答的命令。两个设备间的通信过程如图 3-8 所示。图中，通信是单向的：设备 A 发送信息给设备 B。

在许多网络中，通信设备需要调用称为网络操作系统的编码。网络操作系

统用于控制设备接入网络资源。计算机中普遍使用的网络操作系统为 Windows. NET、Windows XP 与 Novell's NetWare。

大多数网络软件是与登录和退出网络模块封装在一起的。登录与退出网络模块具有的特点包括口令安全性、用户接入特殊文档及软件的确认、一些设备的自动登录特征、帮助菜单、错误信息等。

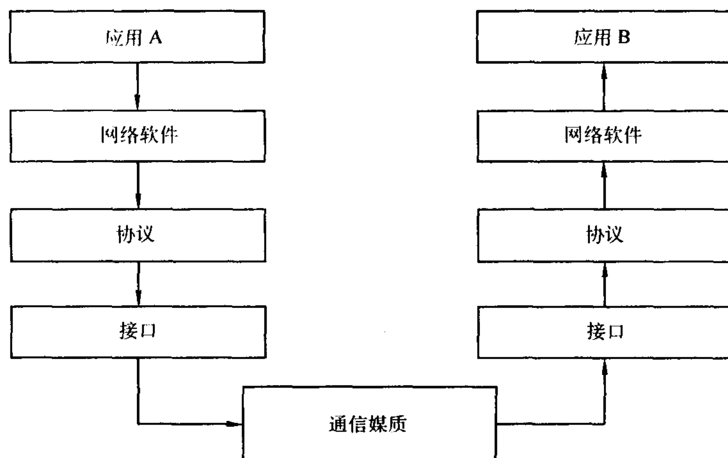



图 3-8　网络设备间的通信过程

## 3.3.2　网络拓扑结构

网络拓扑结构是指网络中的设备与支撑资源的物理配置以及这些设备间的通信方法。拓扑结构对网络的未来发展潜力以及网络的性能均有重要的影响。

拓扑结构主要描述网络节点的连接模式。它决定终端节点、连接点、路由器、转发器与服务器间的通信链路配置。拓扑算法为相应设备选择链路与链路容量，选择基于以下因素：传输延迟、延迟的代价、总通信量和硬件的扩展性。

所有设备，无论它们的拓扑结构如何，通信方式几乎是相似的。它们发送含地址的数据到一个或多个接收器，数据沿通信媒质传输，并在接收端以固定的方式被获取与翻译。为了实现这些方面，网络元素必须服从一些设备间所共享的协议和标准。

网络可以配置成不同的拓扑结构或适当的软硬件所支持的不同拓扑结构的组合。有五种基本类型的拓扑结构：总线型、树型、环型、ad hoc 型与星型。不同的网络拓扑结构如图 3-9 所示。

总线拓扑结构是所有节点共享同一总线的物理几何结构。一个节点在总线上发送信息，被另一个或另一些节点接收。信息只能被符合目的地址的节点所接收。当总线上有信息发送时，所有接收信息的节点均处于被动，这种系统可

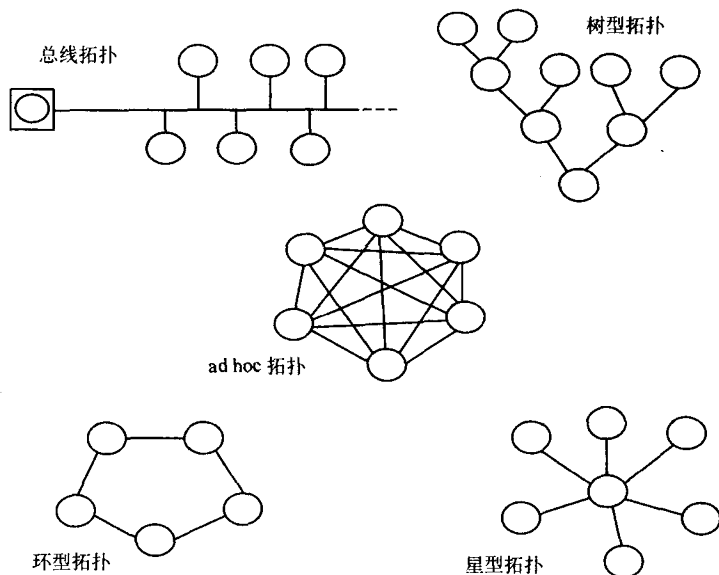



图 3-9　不同的网络拓扑结构

以认为是十分安全的。每个节点在不影响其他节点的情况下可以独立安装、维修和拆除。有缺陷的节点可以很容易地被拆除和隔离。

树型拓扑结构是在总线型拓扑的基础上扩展起来的，电缆在两个方向有分支，但是在任意两个节点间只有一条传输路径。与总线型拓扑结构一样，任何一个节点广播信息时能被连接在网络上的其他任何节点所接收。

环型拓扑结构以点到点的连接方式将每个节点连接到相邻的其他两个节点上，形成一个闭环。发送信息在环上沿单方向从一个节点传送到下一个节点。当环中设备接收到信息信号时，它对所接收的信息进行操作，或者将信号传递给环中的下一个节点。每个节点都有能力识别所有其他节点的地址，并且在任何时间都有相等机会来发送和接收信息。

令牌传递是沿环发送数据的一种方法。在令牌传递中，只有获得令牌的节点才有权力使用信道。得到令牌的节点有权力接入环上的其他节点。当传送完信息后，将令牌传给另一个准备发送数据的节点。当目的节点接收到信息后，返回给发送者一条表明数据已安全到达的确认信息。如果环上有节点不能传递数据或已损坏时，数据可以绕过该节点继续传输。

在一些网络中，中心控制器作为主要控制单元协调其他节点传送信息。现有环型拓扑结构使用灵活的集线器来隔离有缺陷的设备和确保信息的传输。

在星型拓扑结构中，每个节点以点到点的方式连接到中心控制节点上。所有网络业务通过中心节点路由到分支节点中。一个节点必须通过中心节点才能

到达另一个节点。星型拓扑结构有简单的路由算法，此算法主要由包含所有节点的地址查询表构成。

在星型拓扑结构中，中心节点是所有节点中最复杂的部分。其复杂性取决于网络效率、大小及容量。当在中心节点与分支节点间大量通信时，采用星型拓扑结构是最令人满意的。然而，当通信主要在分支节点间发生时，就会产生延迟并且降低效率。

星型拓扑结构的一个优点是它能将资源集中化。另一个优点是星型拓扑结构易于管理。有问题的节点很容易在不影响其他节点性能的情况下被中心节点隔离掉。这种结构的缺点是，如果中心节点失效了，那么连接在其上的所有节点就都不能进行数据传输。

ad hoc 型拓扑结构没有中心节点，它是一种无中心无组织的连接。星型、总线型、树型和环型拓扑结构主要应用于有线系统中，而 ad hoc 型最适合于无线通信网络。在无线通信网络中，设备之间自发地相互通信。所有网络活动包括发现有通信能力的节点都是由节点自己执行的。一旦要在节点间建立通信，节点可以自组织成以上所说明的拓扑结构（如星型、树型）。

ad hoc 网络范围为从被激励源所束缚的规模小且稳定的网络到规模大且具有移动性的高变化性网络。为这些网络设计网络协议是相当复杂的。在不考虑应用的情况下，ad hoc 网络需要有效的分配算法来决定网络的组织、链路时间分配和路由。然而，在一个网络拓扑结构不断变动且非中心化的环境中来决定可行路径和传递信息是一个不明确的问题。在无线通信系统中，可变的无线链路质量、传播路径损耗、衰落、多用户干扰、功率消耗和拓扑结构变动等这些因素都是主要问题。网络应能自适应地改变路由路径来减小这些因素的影响。Ad hoc 网络应用在无线元器件中，这个拓扑结构将在第 4 章与第 5 章中进行更详细的讨论。

### 3.3.3 互联网

将局域网连接在一起构成互联网。许多局域网通过中继器、网桥、路由器及网关来互相连接。图 3-10 通过参考开放系统互连（OSI）模型来说明局域网连接设备以及它们的工作层次。

中继器是第一层设备，位于发送器与接收器之间。它们的功能是增强输入信号并将信号重新转发，使得信号能够远距离传输。中继器是在物理层上操作的，因此它们不需要理解或翻译数据帧，也不需要增加任何新功能。由于中继器是非智能的，因此它们只能用于连接相同类型的网络。

网桥位于第二层，能够读取包含在帧中的目的地址与源地址。网桥能使帧沿不同路径进行传输。网桥不能在不同局域网间起到解析器的作用，它们只能

连接具有相同类型的网络。如果在互联网中使用不同的网络技术，那么网桥不能够转换帧。

网桥的智能有限，它具有过滤帧的作用，将帧转发到与目的站相连的端口上。这对局域网的有效运行来说是非常有用的特性，因为它可以减少通信量和冲突的发生。网桥大大增加了网络吞吐量，尤其在相似局域网的高速互连设备上得以体现。这在不需要协议转换的情形下尤其正确。

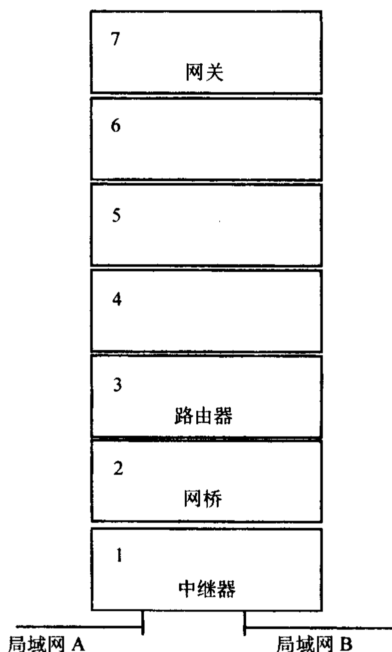


图 3-10　局域网互连设备以及它们的工作层次

当网桥接收到一个帧时，它先检测源地址，然后按照一系列规则来处理这个帧。如果网桥知道这个目的地址，就将这个帧转发到这个目的地址上。如果到达帧的地址没有被详细说明，则这个帧将会被忽略，这样就会导致信息的丢失。如果帧的地址不在网桥的地址表中，这个帧仍然会被转发。网桥通过增加新的发送设备与接收设备的地址来不断地更新地址表。

网桥使用第二层信息来将数据传递到正确的目的地址。路由网桥或桥式网桥具有其他额外功能，能够定义广域网端口，或能执行不同类型网络间的转换。

路由器是第三层网络设备。它们是高智能的，并能充分认识它们所参与的网络。路由器能决定通过网络到达目的站的最佳路由，能对信息流分配优先级，并能提供一定的安全性。如果路由器运用共同的协议，如传输控制协议/网络协议（TCP/IP），则路由器能够连接具有不同网络协议的局域网。

路由器同网桥一样，也具有过滤作用，但它们能提供更好的网络管理功能。由于路由器具备这些附加特性，所以它们的运行速度相对较慢。路由器通过路由算法来完成源站到目的站的最佳路径选择。路由算法要考虑复杂的网络因素，其中一个就是处理分组的方式。路由器根据业务量将一个长帧划分成若干个组，路由器为这些组决定最佳路由并管理这些组的发送时间，这样将组发送到目的站后便于正确封装成原帧。

网关工作在第七层，能够连接两个完全不同的网络。它们在两个网络的主机间充当翻译者。然而，由于网关不仅要翻译和进行协议转换还要路由帧，所以它们是相对较慢的设备。

### 3.3.4　Internet 和 Intranet

Internet 是指将全球网络连接在一起的网络。Internet 是由多种计算机网络构成，网络间通过服务器来连接。服务器是连接特定局域网到 Internet 的中心计算机，它是由私人或公众 Internet 服务提供商来维护。许多服务器通过网关和路由器来连接到 Internet。Internet 通过互连成千上万个路由器来形成。连接在 Internet 上的计算机间的信息传递是通过路由器和网关实现的。当路由器和网关将信息从源地址传递到目的地址时，它们动态地了解网络的运行状况。路由器采用分组交换技术来实现计算机间的信息传递。

TCP/IP 组是用于 Internet 通信的强大工具。TCP 是第四层协议，通过将信息分组来向应用层提供服务。IP 提供分组交换管理。

每台连接在网络上的计算机都有自己的地址——Internet 地址或 IP 地址。所有 IP 地址是由 4 组被句号隔开的 8 位数字构成（如 123.234.345.456）。前两组数字用来识别网络，第三组用来识别子网，最后一组用于识别子网中的计算机。IP 地址是从服务提供商（ISP）处获得的，服务提供商有权使用从上级注册处获得的分组地址。

IP 地址有一个使用域名而不是数字的命名系统。使用统一资源定位器协议将特殊文件放置在网络上。例如，地址 http://www.curtin.edu.au/mail 是指科廷大学的电子邮箱。在此地址中，http://表明协议或接入的方法，www.curtin.edu.au 表明了机器名或其他的域名。Internet 名字后跟一条斜线，表明被请求信息所在的目录和文件名。除了超文本传输协议（http）外，还有其他的协议，如文本传输协议（ftp）和远程登录（Telnet）。

Internet 有很多种应用，如电子邮件（E-mail）、转账、文件定位与显示、新闻组布告栏（如用户网）、文件传输（如 ftp）、共享文档（如 Gopher）、用浏览器搜索网页等。万维网（WWW）是 Internet 上最普遍的应用。它是基于客户端/服务器模式的，用户是客户端，万维网是服务器。万维网是一个系统，并且是用于网上计算机间进行信息存储、重新获取、格式化与显示的标准集合。万维网上的文档是用超文本标签语言（html）格式编写的，并通过 http 进行转发。

企业内部网（Intranet）是一个类似 Internet 的私有网络，它是由组织者们所建立且只能被组织成员或授权的个人和团体所访问。Intranet 和 Internet 使用相同的结构体系和标准。大多数 Intranet 连接在 Internet 上，使授权用户具有更广的资源访问权限。两个或更多的 Intranet 连接构成以太网。

## 3.4 协议

随着网络越来越复杂和覆盖范围越来越广，对将设备连接到网络上与网络自身进行互连的需求在不断增长。因此，对成功连接制定的准则、规范、标准的需求也在成比例地增加。这就需要制定全国乃至全球都能够接受和操作的准则和规范。

协议是由相关权威机构达成一致的一系列规范构成，它能够保障设备间的成功通信。两个设备间互相通信的最简单情况是它们必须遵守相同系列的规则和步骤，这些规则和步骤规定了设备间如何进行通信和交换信息。这些规则的最低限度应包括如何翻译信号，如何在网络上识别自己和其他设备，如何发起和结束通信，如何管理网络媒质上的信息交流等。协议必须足够全面，从而能够控制一个通信系统中的所有基本需求。其中一些基本需求是：

- 网络拓扑：星型、环型、总线型、树型或它们的组合。
- 按 ISO 参考模型分层：物理层、数据链路层、网络层、传输层、会议层、表示层和应用层。
- 数据通信模式：单工、半双工或全双工。
- 信号类型：数字、模拟或两者的结合。
- 数据传输模式：同步、非同步等。
- 支持的数据传输速率：从每秒数比特到每秒数千兆比特，这取决于运行频率和传输媒质。
- 支持的传输媒质：有线、射频、光纤、微波等。
- 媒质接入控制方法：带有冲突检测的载波监听多路接入（CSMA/CD）、控制令牌等。
- 数据格式：基于数据传输模式和单独的协议说明书。
- 错误检测方法：奇偶校验、分组和校验、循环冗余校验（CRC）等。
- 错误控制方法：重复校验、自动重发请求（ARQ）等。
- 流控制方法：X-ON/X-OFF、窗口机制、排序等。

在通信系统中，有许多说明通信过程特征的不同类型的协议。开发协议使整个网络或部分网络或网络中的通信设备间能够正常通信。例如，一些协议只是为连接而制定，一些是为传递信息而制定等。大多数协议是为 OSI 参考模型中不同的层次所制定。完成两个设备间的连接，必须服从 OSI 模型中的最低几层协议。解决特定问题的文件信息传输必须遵循体系中的较高层协议。OSI 参考模型将在下一节中进行详细讲解。

### 3.4.1 OSI 模型

在网络设备间通信需要一些被认真安排的行为或过程，这样信息在发送器和接收器之间才能够成功地传输。网络行为与作用的概念和网络中设备的配置同样重要。对建立一个能阐明网络概念与行为的结构框架已提出了多种模型。在所有模型中，ISO 提出的 OSI 参考模型最为成功。这个模型被普遍称为 ISO/OSI 参考模型，或被简称为 OSI 模型。

由于 OSI 模型被广泛应用且有大量的软硬件网络元素符合这种模型，所以它已成为所有类型的通信与计算机网络的关键部分。采用这种模型的一个好处就是它能将不连续的行为和作用联系在一起，以使很多通信行为变得清晰。OSI 模型从简单的应用到完全开放的系统都详细阐述了所有类型的网络。OSI 模型在互联网领域起着举足轻重的作用。

### 3.4.2 OSI 模型的结构

OSI 模型被划分成七层（见表 3-1）。这种分层方法有利于阐明网络顺利运行的通信过程。各个层次是 OSI 模型的基本单元。从本质上讲，网络能被分解成一系列相关的任务，每个任务在通信过程中均作为独立单元进行定义。这种分层方法从支持网络的硬件到应用软件都降低了网络的复杂性。每个单独的任务或活动在每一层中被独立处理，并且每层中的问题均能独立解决。一旦各层次单元被独立开发，它们就能用相互关联的任务或活动连接成一个完全的系统。这种方法通过分解每层中的问题来解决多种问题，并且用可能的独立解决方法将整个系统问题分解成为一系列较小的问题。

**表 3-1　ISO/OSI 参考模型**

| 层　次 | 功　能 |
|---|---|
| 过程控制 | 应用与系统活动控制 |
| 表示控制 | 压缩、加密、外围设备加密和格式化 |
| 会议控制 | 支持会话 |
| 数据传输 | 端到端控制、信息交换、可靠性、差错控制 |
| 网络控制层 | 企业网运行、寻址和路由 |
| 数据链路 | 使序列能在单向物理数据链路上被交换 |
| 物理层 | 物理媒质上的传输 |

在参考模型的顶端是应用层，它向网络浏览等应用提供一系列的接口。在参考模型的底端是物理层，物理层包括网络媒质、信号、物理连接等。网络通信所必需的所有行为都发生在顶端与底端之间。

如图 3-11 所示，数据在发送机与接收机之间进行传递与解析。层次解析需

要遵循一系列过程，设备上的每一层像是与其他设备上的对等层在进行通信。这种方法在对等层间提供虚拟通信。在发送端，数据沿协议栈从应用层到物理层向下运行；在接收端，则相反，沿协议栈自下而上运行。

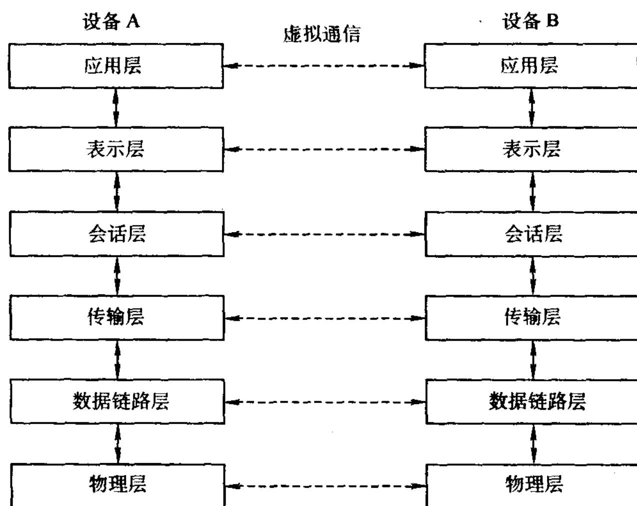



图 3-11　OSI 模型的层间关系

在发送端，在数据沿协议栈向下从一层传递到下一层之前，它首先分解成协议数据单元（PDU），PDU 也称为分组或有效载荷。PDU 是一个信息单元，当沿栈向下从一层传递到下一层时，它作为独立信息传递到对等端。为了传递到它的对等端，协议软件在它将分组传递到下一层之前，先增加自己的净荷信息、格式和地址到 PDU 中。由发送端产生的 PDU 应与接收端的 PDU 版本一致，这点非常重要，因为只有这样接收器才能够识别和解析发送分组中的信息。

当数据到达接收端后，分组应该沿协议栈从物理层到应用层向上传递。在每一层中，软件读取 PDU 数据并解析信息。每层除去自己的特有信息后，将 PDU 传递到更高层。如有需要，它也执行任何附加的处理过程。

对于任何设备，无论是发送器还是接收器，OSI 参考模型的每个独立层各自都有一套明确的功能集，并且每层都能与上一层或下一层进行通信或相互影响。每层只与发送器及接收器的对等端的信息交换有关。在发送端，向下发送数据时，每层都会在数据周围放置一个“电子信封”；相反，在接收端，数据沿栈向上传递时，每层会将信封移掉。

接口使 OSI 模型的各个层次相互隔离。一层要向另一层发出请求，必须通过接口传递。每一层建立在它的下一层的功能和活动之上，并能支持它的上一层。实质上，每层为它相邻的更高层提供服务，并且上层对较低层次不需要详细了解。所有网络设备是与相兼容的协议栈和协议组封装在一起的。协议组是

特定层次对应软件元素和服务的集合。只有使用协议和相应的驱动程序才能够接入网络。

OSI 参考模型的各个层的功能讨论如下：

物理层位于第一层，在这层上建立物理网络连接和控制传输技术。物理层将要传输的数据分为若干帧，并为接入网络媒质做好准备。这层上的协议所涉及的参数包括信号电压浮动和比特持续时间、传输类型（单工、半双工、全双工）、每个终端如何建立连接等。因此，物理层决定了比特流转换成传输信号的方式。相兼容的接收设备接收信号后，将其转换成比特流来重构信息。在物理层决定了信号的编码、定时与解码。一个典型的物理层协议和硬件的例子是用于串行通信的 RS-232 标准。

数据链路层处于第二层。在这层中，发送信息被封装成数据帧，并且每个信息发送后要等待接收方的确认。数据帧包含发送方和接收方的标识符与控制信息。目的标识符提供了目的接收器的网络地址，发送方标识符为返回信息和确认提供了网络地址。所有发送帧都包括链路层上的目的地址，如果更高层次需要源地址，也会将源地址包含在发送帧中。在这一层上，数据的完整性被发送的检测码和纠错码所检验。关于数据完整性检验有许多种技术如 CRC，CRC 是基于发送帧比特模式的一种特殊数学函数。关于错误检测与纠正的信息也作为帧的一部分被发送。接收端通过特殊的数学函数来决定可能发生的错误。如果没有检测出错误，则认为数据是以原始的形式被接收的。目的站接收到数据后，第二层协议除去与本层相关的信息并把原始数据打包传递到下一层。有许多运行在 OSI 模型第二层中的软硬件的例子，如 IBM 的二进制同步通信（BI-SYNC）协议、X. 25 等。

第三层是网络层。网络层处理传递信息的寻址问题，并将逻辑网络地址转换成为它们的物理地址。物理网络地址就是媒质访问控制（MAC）地址。MAC 决定了如何将传输信息从发送端路由到接收端。第三层考虑了网络条件、服务信息质量、更换路由的代价和传递优先级等重要因素。网络层处理分组交换、数据路由和拥塞控制。为使这一层能顺利运行，将长的发送数据划分成较小的组以便进行处理。数据分裂和分割成很多组后，需要的传输时间就会变短，从而易于管理。当数据从一种网络媒质传递到另一种网络媒质时，网络层处理分组并帮助重组不同传输媒质可能引起改变的数据。收到的分组被重装成信息后压缩成原始形式来传递到较高层。

第四层是传输层。传输层管理从发送方到接收方的数据传输。这层的一个重要任务是提供流量控制，确保发送数据的接收器有能力处理它所接收到的所有数据。因此，长数据净荷被分成与最大分组大小相匹配的部分，这个最大分组大小是网络媒质和接收器可接受的。接收端的传输层将以分组形式到达的数

据重组成原始形式。传输层决定了通过可获取信道进行路由分组所必需的并行路径和复用器。

第五层是会话层。会话层建立了网络上系统到系统间的连接，并且允许两方进行通话，这个通话也称为会议。只要会议继续就会产生信息的交流和数据的传输。这一层包含许多功能：建立会话，监视会话识别过程，提供数据流中的安全性，提供连续的数据和信息交换以及任务结束时会话的终止。会话层也确保链路上两端任务的同步。在数据流中放置校验标识，这样做以便于当通信在某点失效时，只重新发送最近校验标识后的数据。会话层控制登录与退出系统，从查询表中核实用户身份并提供记账与管理功能。

第六层是表示层。表示层处理数据格式，使它适合网络通信。发送数据时，表示层将数据转换成一般格式，以便它们能在网络上精确地传输。接收数据时，表示层将数据从一般网络格式转换成满足接收设备需求的格式。表示层还执行了很多其他任务，如协议转换，处理库程序，执行数据加密与解密，解决字符集问题，管理数据压缩和解压缩，并提供图形命令与编码转换。

第七层是应用层。应用层是 OSI 参考模型的最高层。它能够被个人用户看到，并为获得网络服务的应用提供一系列接口。应用层中，网络的透明性表现在能隐藏用户资源的物理分布。它为文件传递、信息处理、数据库管理等应用提供服务支持。应用层能够分解分布式应用中的一些机器间存在的复杂问题。

### 3.4.3 IEEE802 网络模型

IEEE802 网络模型是在 OSI 参考模型基础上的一个改进。IEEE802 展示了一系列不同类型网络的规范，因此在此模型中有很多标准协议。这些协议标准的规范包含和满足大部分现有网络的需求，并且它们是无限制的，可允许发展新类型网络。IEEE802 标准是国际上最有影响力的网络标准。

IEEE802 标准在物理层和数据链路层上扩展了 OSI 参考模型。数据链路层划分成两个子层：逻辑链路控制（LLC）子层和媒质接入控制（MAC）子层，如图 3-12 所示。

LLC 子层控制数据链路通信并定义了逻辑接口点的使用，逻辑接口点也称为业务接入点（SAP）。在一些应用中 LLC 也负责差错恢复。有许多种 LLC 运行模型，其中一些模型需要 LLC 检测和恢复在所选媒质中传输所发生的错误。

MAC 子层可以使物理层上的多种设备共同接入。MAC 与特殊设备的内部操作直接通信，例如配有网络接口卡（NIC）的计算机。MAC 也负责设备与网络间的无差错传输。

IEEE802 模型主要是描述网络物理元素的标准。物理元素包括网络适配器、电缆、连接器、信号技术、MAC 等。这些标准大多数存在于 OSI 模型的最低两

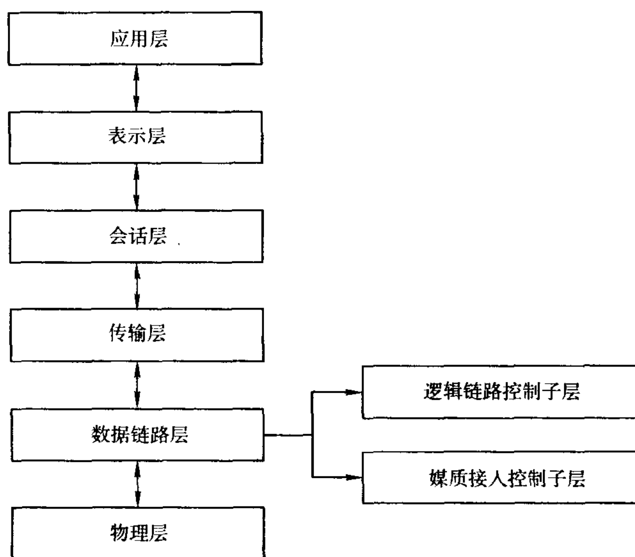



图 3-12 含有数据链路子层的 IEEE802 模型

层，即物理层和数据链路层。IEEE802 也参与管理、连接和断开网络环境内外的设备。

## 3.5 标准

标准需要进行详细讲解，与第一章所解释的工业现场总线情况一样，相似功能的设备、通信系统与网络可能具有一些令人混淆的标准。标准这个术语有很多种定义。牛津英语字典中标准作为名词定义为“①质量或达到的水平；②所需的或一致要求的质量或达到的水平；③在相对估计中作为一种量度器、规范或模型。”作为形容词解释为“①作为正常或平均水平可被使用或接受的；②(同一大小、尺寸等) 均匀地被使用或生产。”从这些定义中得出，标准一词含有相对意义，相对值可能是物理量和/或过程与步骤。国际标准政策建议委员会(http：//www. nist. gov/) 把标准描述为对术语进行定义的一系列指定规则、条件或需求。定义的术语包括元件分类，材料、性能或操作的规范，过程的描述，或在描述材料、产品、系统、服务或实践上质量和数量的测量法。

由于标准一词是一个广泛术语且在许多背景下使用，所以有许多种类型的标准。除了基本的物理测量标准外，还有实践和协议的发行标准。实践与协议可以定义为描述实现同一结果的操作和过程的文件。物理标准和发行标准在形成国内和全球经济中都起了基础性作用。发行标准是非常重要的，因为它们能提供关于做什么和如何做的文本和说明信息。

由于国家和全世界的参与，有很多机构组织都在负责调查、开发、决定和维护支持全球科学和工业活动的相关标准。但是，国内和国际标准权威机构在制定标准过程中常受各种国内外压力、建议的分歧和商业利益的影响，并且在标准化过程中不总能产生理想的结果。这样就不幸导致了有一些用不同版本和解释描述相同进程的令人混淆的标准。除此之外，发行时间过长，并且当研发出新的技术时，标准权威机构和手续都发生了改变。这样就导致了一个特定问题有大量的标准。

标准在本质上是一种官僚政治过程，在快速变化的技术环境中会变得过时。标准使用户（在移动通信情况下）和生产组织大大受益。支持标准的供货商能深入市场，并通过提供可共同操作的元件、设备、系统和软件来维护他们的市场地位。

标准由各种国家和国际团体所开发，有时是完全独立运行的，因此对相同课题有不同版本的标准。认识到这一点是非常重要的。国家和国际的标准化组织有 ISO、国际电子技术委员会（IEC）、IEEE 和美国国家标准委员会（ANSI）。成员数在全球可增长到数千个。所有这些组织都有大量国内部门、委员会、子委员会和工作组来支持它们的活动。

无线技术的演进和扩展是一个动态的前进过程，因此当技术在不断变化和发展时，这个领域只有少量标准。然而，直接应用于无线元器件系统的标准已经有了一些关键性的发展。这些相关标准的例子有 IEEE802、高性能无线局域网（HiperLAN）、PAN、蓝牙（Bluetooth）、蜂窝分组无线标准和 IEEE1451。

### 3.5.1 IEEE802 标准

IEEE802 和 ISO/OSI 模型在组织的协调下形成并相互兼容。IEEE802 探究了不同类型的网络、互联网、高速网络和网络安全的更多细节。网络标准的编号为 IEEE802.1 ~ IEEE802.18。每个标准可能具有一系列的标准，这些标准具有相同号却有不同扩展号，如 IEEE802.11b、IEEE802.11g 等。一个完整的 IEEE802 标准列表见表 3-2。

表 3-2 IEEE802 无线网络标准

| 标准 | 名称 | 功能 |
|---|---|---|
| IEEE802.1 | 网际互连 | 路由、网桥和网络通信 |
| IEEE802.2 | 逻辑链路控制 | 数据流上的错误控制和流控制 |
| IEEE802.3 | 以太网局域网 | 以太网媒质和接口的格式 |
| IEEE802.4 | 令牌总线局域网 | 令牌总线媒质和接口的格式 |
| IEEE802.5 | 令牌环局域网 | 令牌环媒质和接口的格式 |

（续）

| 标准 | 名称 | 功能 |
|---|---|---|
| IEEE802.6 | 城域网 | 城域网技术、寻址和服务 |
| IEEE802.7 | 宽带建议组 | 宽带互联网媒质、接口、设备 |
| IEEE802.8 | 光纤建议组 | 光纤媒质、网络类型、技术 |
| IEEE802.9 | 集成网络 | 网络媒质中的语音和数据业务的集成 |
| IEEE802.10 | 网络安全 | 网络接人控制、加密、认证、其他安全 |
| IEEE802.11 | 无线通信网络 | 无线通信网络、频率使用 |
| IEEE802.12 | 高速网际互联 | 多种 100Mbit/s 技术 |
| IEEE802.13 | 未使用 | |
| IEEE802.14 | 不存在的工作组 | 电视电缆上的数据传输 |
| IEEE802.15 | 无线城域网 | 无线城域网 |
| IEEE802.16 | 有回弹力的分组环 | 高速基于环的局域网和城域网 |
| IEEE802.17 | 无线建议组 | 基于无线电发送的无线标准 |

IEEE802.11 无线局域网工作组在 1987 年成立，并开始对工业、科学和医学（ISM）波段的扩频无线局域网（WLAN）制定标准。直到 20 世纪 90 年代，IEEE 的无线局域网才有了发展动力。那个时候 Internet 已经相当普及，便携设备和膝上电脑也被大规模接受，这促使无线局域网成为现代无线通信的一个重要快速发展部分。IEEE802.11 标准在 1997 年形成，目标是为无线局域网生产商提供共同的生产标准，局域网采用 11Mbit/s 直接序列扩频技术和 2Mbit/s 用户数据传输速率。由于国际标准是公开的，许多生产商开始按国际标准进行生产，于是市场也开始迅速扩大。于 1999 年批准通过了 IEEE802.11b 这个高速率标准，提供了 11Mbit/s 和 5.5Mbit/s 两种新的用户数据传输速率。

IEEE802.11（简称 802.11）标准阐述了关于无线通信网络的问题。由于出现了新的无线技术和应用，IEEE802.11 将继续被开发。许多无线通信网络设备和系统的生产商已经开发出了低廉可靠的无线局域网和服从 IEEE802.11 标准的国内工业使用的相关设备。IEEE802.11 标准有一些版本，当前的版本是 IEEE802.11b，工作在 2.4GHz 频段，具有 1Mbit/s 带宽；IEEE802.11a，工作在 5GHz 频段，具有 54Mbit/s 带宽；IEEE802.11g，是一个高速无线标准，载频为 2.4GHz 且速率高达 54Mbit/s。IEEE802.11 无线局域网标准被普遍称为 Wi-Fi。

### 3.5.2　无线以太网概念

IEEE802.11 无线通信网络被视为以太网的扩展，以太网使用电磁传播而不是电缆和光缆作为传输媒质。然而，大多数 IEEE802.11 网络与一些能同无线组成单元协调工作的以太网段相结合。与 IEEE802.11b 相兼容的设备通信范围很

小。但是，通过使用中继器和其他辅助设备，网络的范围能从几米延伸到几百米，网络的延伸范围取决于工作领域中存在的环境因素和射频干扰。

IEEE802.11b 使用位于星型结构中心的无线接入点（WAP）。配有无线通信设备如 NIC 的工作站发送分组到 WAP，然后 WAP 再将分组转到目的工作站。

有线以太网使用 CSMA/CD 作为接入方法，但是无线通信网络使用这种方法存在特殊问题。CSMA/CD 需要所有站能互相监听，以便它们能识别到哪个站在发送数据。如果网络中的任何两站试图同时发送数据，就会产生冲突。在有线通信网络中，发送站将会注意到有冲突发生并试图重新发送数据。然而，IEEE802.11b 无线站不会同时发送和接收数据，所以即使有冲突发生也不可能被发送站检测到。基于这个原因，IEEE802.11b 详细说明了 CSMA/CA 接入方法，这种方法中对每个发送和接收的分组都需要得到接收机的确认。

无线通信网络存在的一个问题是隐藏节点问题。由于一些节点不能互相进行通信，因此在这种情况下，它们无法意识到它们在同时发送数据。为了解决隐藏节点问题，IEEE802.11b 采用了传输前需要握手的规则。在实现过程中，发送节点首先必须向 WAP 发送一个请求发送（RTS）分组。如果所有节点都被清除，WAP 将发送一个清除发送（CST）信息，接着发送节点就可以开始通信了。

IEEE802.11b 标准中规定了 11Mbit/s 传输速率，但是在恶劣环境中很难达到这种速率。因此，对于可靠连接来说，速率可能逐渐从 11Mbit/s 减少到 5.5Mbit/s 再到 2Mbit/s，最终减少到 1Mbit/s。在 IEEE802.11b 标准中，没有固定的数据传输速率，这是因为可靠通信在很大程度上取决于传输环境，而数据传输速率也是由环境条件决定的。

通常情况下，IEEE802.11b 网络在无阻碍物的环境中具有的最大传输距离为 100m。这个距离可以通过使用大的高质量的天线来扩展。然而，随着传输距离的增加或传输路径中障碍物的增多，数据传输速率会下降。

IEEE802.11g 和 IEEE802.11a 标准是 IEEE802.11b 的扩展。尽管 IEEE802.11g 与 IEEE802.11a 相互竞争，但仍具有很多相同点。IEEE802.11g 的带宽是 54MHz，而 IEEE802.11b 的带宽是 11MHz。IEEE802.11a 标准使用了免许可证的 5GHz 频段，但当前 IEEE802.11a 的产品生产成本非常昂贵。IEEE802.11g 后向兼容 IEEE802.11b。

IEEE802.11a 的使用频段是 5.15～5.35GHz 和 5.725～5.825GHz，并且至少允许同时存在 8 个信道。另外，在美国还允许 IEEE802.11a 使用 5.47～5.725GHz 上这 255MHz 频段。IEEE802.11b 和 IEEE802.11g 使用位于 2.4GHz 和 2.4835GHz 之间的这 83.5MHz 频段，并且允许同时使用三路信道。

在这些相互竞争的标准中，IEEE802.11b 好像最能被接受，但是它已经应用了很长时间。在两个更高速的标准中，IEEE802.11g 向后兼容 IEEE802.11b，从

而很容易进行带宽升级。由于 IEEE802.11a 需要更高的频率，所以很难升级到 IEEE802.11b，但它具有更高的可靠性和灵活性。那些能够提供高速传输的标准将最终统领市场，并且能被消费者和生产商大规模接受并采用。

### 3.5.3 IEEE802.16 无线城域网

IEEE802.16 无线城域网（WMAN）标准与欧洲的高性能无线局域网（HiperMAN）是对等的。它可以被看作有线或基于光纤的城域网的替代者。IEEE802.16 是许多在全球运营的无线互联网服务提供商（WISP）的骨干网。基站是无线城域网的基本组成部分。基站作为网络集线器能被非常容易地架设在建筑物或发射塔上。基站的传输距离较远，最典型的是 10 ~ 15km。基站也可以作为无线通信网络和互联网之间的桥梁。IEEE 协会如 Wi-Fi 联盟就试图确保 IEEE802.16 和 IEEE802.11 的产品可以相互兼容。一些无线城域网使用免许可的 2.4GHz 频段，并采用正交频分复用（OFDM）技术来保证数据的传输。

### 3.5.4 基于码分多址的标准

码分多址（CDMA）是一种蜂窝通信技术，与全球移动通信系统（GSM）、增强型数字无绳电话（DECT）和通用无线分组业务（GPRS）相互竞争。CDMA 是由高通公司和爱立信公司共同开发的，它是一种拥有大的容量及小的小区半径的蜂窝移动通信系统。它采用了直接扩频技术和特殊编码技术。第一代 CDMA 技术称为 CDMA One（也称作 IS-95）；第二代是 CDMA 2000，它是当前的主流技术。CDMA2000 有几种不同标准，分别是 1X EV、1X EV-DO 和 MC 3X。在第三代移动通信系统中，新的 CDMA 版本已经出现在市场上了；这里有一些典型的例子，像占用带宽为 1.25MHz 的多载波 CDMA2000 1xMC 和 HDR（高数据传输速率），以及 3xMC 和占用带宽为 5MHz 的直接扩频 WCDMA。

CDMA2000 是一种宽带无线接入技术，由于使用了 Turbo 码，与 CDMA One 相比，它在性能和容量方面有着明显的优势。CDMA2000 为了在有效及高速分组数据业务方面有所提高，采用了先进的 MAC 技术。其物理层技术特征集中在专用控制信道（DCCH）和公共控制信道（CCCH）上。CDMA2000 标准也加入了先进的多媒体服务质量（QoS）能力，这样就可以在相互竞争的业务之间实施调度和授予优先级。

### 3.5.5 基于时分多址的标准

时分多址（TDMA）标准只使用一个信道，并且将其分成了一系列的时隙。每个用户只允许使用这些时隙中的一个时隙。有些系统采用动态时隙分配策略，这样就可以避免由于通话的某一方长时间静默而造成的时隙浪费。

TDMA 是在 TIA-54（也称为 D-AMPS）标准中第一次实施的。TIA-54 提供了 3 个 TDMA 的语音信道，每一个都是 30kHz 的模拟信道。下一代的 TDMA 系统称为 IS-136，把 TDMA 技术应用到了控制信道。IS-136 已经被 ANSI 所采纳，并且作为 TIA/EIA-136 系列标准发布。UWC-136 RTT 标准基于增强的 ANSI-136 TDMA 标准，并引入了其他接入技术，如 GSM、EDGE 和 GPRS。它包括一些增强的接口、容量、特征和业务。由于调制方法的改变，引入了新的时隙格式、新的交织技术、可选编码和其他一些增强技术，从而实现了更高的频谱效率。

像在 TIA IS-54、IS-136 和 TIA/EIA-136 中定义的 TDMA 一样，TDMA 是将 30kHz 蜂窝信道分成 3 ~ 8kbit/s 时隙，这样就可以支持 3 个用户严格地单独使用了。这种方法理论上能使蜂窝移动通信系统在频域上的容量扩大 3 倍。

当前版本的 ANSI-136 支持 30kHz 的信道间隔、6 个时隙、每个信道 3 个呼叫、高达 28kbit/s 的电路交换数据传输速率及其他。遵从 ANSI-136 版本的 UWC-136 支持 30kHz、200kHz 和 1.6MHz 的信道间隔，6 个时隙，每个信道 3 个或 6 个呼叫，以及高达 384kbit/s 或 2Mbit/s 的高速分组数据传输速率。

### 3.5.6 GSM 和 GPRS 标准

GSM 是一个数字蜂窝移动通信系统，已在全球广泛应用。GSM 网络工作在 3 个不同的频段上：GSM 900 工作在 900MHz 频段上，主要用于欧洲及世界其他一些国家和地区；GSM 1800 或 DCS 1800 运行在 1800MHz 频段上，在许多国家中使用（如法国、德国、瑞士、英国和俄罗斯）；而 PCS 1900 或 DSC 1900 工作在 1900MHz 频段上，当前在美国和加拿大使用。除了它们的工作频段不同以外，这几种系统的惟一区别是功率级别和信令上的一些微小差别。在 GSM 网络中，GSM 标准用于提供不同实体之间的接口。近来引入了许多标准来支持 GSM 网络。这些标准有针对无线资源协议的 GSM 04.31（v.8.1.0）、针对基站系统接口层的 GSM 08.71（v.7.2.0）及其他。

GSM 有许多特征现在已经在使用元器件的系统和网络中加以应用了，像 GSM 中的短消息业务。该业务允许传送或接收 126 个字符文字信息。数据传输速率是 9600bit/s，并且使用了有效的加密技术以防止窃听和偷听。

GPRS 是基于 GSM 的。它是一种基于分组的无线通信业务，其数据传输速率为 56 ~ 114kbit/s。基于分组交换的业务比基于电路交换的业务效率要高得多，这是因为这种基于分组交换的技术每次将信道分给许多用户共享而不是把信道只分给一个用户使用。GPRS 通过链路层发送/接收调度协议，可以实现若干个用户共享同一个 GSM 时隙。

在这里，蓝牙技术可以作为 GPRS 的补充。其中蓝牙技术可以通过无线电连接有效地替代设备间的无线连接。GPRS 也支持 IP 和 X.25。X.25 是主要在欧洲

使用的分组交换协议。因此，通过使用 GPRS，用户可以接入支持分组交换系统的 X.25 和 IP 这两种形式的数据网络。

GPRS 使用一个 TDMA 的分组数据信道（PDCH）来传送用户的数据及信息。GPRS 有一系列标准，例如 GPRS-136。这些标准的主要目标是提供网络架构、无线通信技术和各种接入协议，如 GPRS 和其他网络间的漫游。GPRS-136 数据模型用分组交换网络节点覆盖电路交换节点来提供业务、注册、移动性管理和计费。GPRS 是向 EDGE 和全球移动电话业务（UMTS）演进的一个过渡。

### 3.5.7　其他无线通信网络标准

除了以上介绍的，还有许多其他的无线通信网络标准。像混合的 CDMA/TDMA、增强数字移动电话系统（D-AMPS，也称为 IS-54）、DECT、EDGE、GSM EDGE 无线接入网络（GERAN）、iMode、个人通信业务（PCS）、个人数字蜂窝（PDC）、UMTS、微波存取全球互通（WiMAX）及其他。这些标准在此就不做详细介绍了。如果想要了解其详细信息，请自行查阅参考书。

### 3.5.8　支持智能传感器接口的 IEEE1451 标准

针对硬件架构，软件和当前智能传感器的通信出现了一些新的标准。这些标准对无线元器件、元器件应用和网络都进行了革新。

在传统的元器件与传感器输出时，模拟信号需要做进一步的处理来满足测量和显示的需要。与微电子和微处理技术结合使用，使传感器与元器件增加了许多功能。另外，现在又出现了新的技术，这些技术可以使得传感器信号在数字平台上直接接入和处理而不需要特定的电路。网络具有综合通信能力，已经出现了能与传感器直接交互的网络。传感器网络正在普及，并且正在测量领域引起重大变化。

智能传感器及相关网络技术的出现和快速发展使得智能传感器在许多测量和控制应用领域成为了一种经济的有吸引力的方案。然而，现在仍存在许多不兼容的网络和协议，使得很难大量接入传感器。除此以外，一个针对某一特定网络的传感器接口无需同其他网络一起工作。很明显，当前没有特别的控制网络正在变成工业标准。好像会通过不同网络的共存来为具体的产业服务。许多设备商对于支持何种网络还不明确，他们在是否进行大规模使用传感器产品上还犹豫不决。这种情况阻止了智能传感器网络和技术的大规模使用，尽管当前都在强烈渴望建设和使用它们。

在这种情况下，IEEE 的元器件应用和测量协会成立了传感器技术委员会，这样可以组织一系列生产企业来提供一个公开的论坛以交换关于传感器接口问题的想法。因此，提出和采纳了 IEEE1451 系列标准。

针对智能传感器接口的IEEE1451标准的目标是定义一系列通信接口，用于将传感器连接到基于微处理器的系统、元器件或在独立网络环境中的现场网络中。IEEE1451是一系列标准，为智能传感器和传感器上基于网络的数据认知和控制定义接口。IEEE1451的目标是在使用现有的网络技术，连接和通用软件构架的前提下使问题更加容易解决。标准允许应用软件、现场网络和传感器决策独立进行，从而为选择最适合特殊应用的产品和供货商提供了灵活性。

IEEE1451标准的最终目标是提供一些方法用来实现传感器和网络间的相互交换以及传感器和网络间的互通性。为了实现这个目标，这些标准在处理连接时提供了一些明确的测量和控制这些设备的方法。遵从这些标准的传感器应携带一些关于序列号、校准因子、精度标准等的信息。在安装过程中，也应读入位置信息。

IEEE1451协议组可以分成两个基本部分：

- 为连接传感器到微处理器或元器件系统而定义的一系列硬件接口；
- 在使用现有网络技术时，为连接传感器到不同的网络而定义的一系列软件接口。

可以理解，IEEE1451标准有大范围的应用。IEEE1451将其分为6个部分：1451.1～1451.6。

IEEE1451.1是第一部分，称为网络应用处理器（NCAP）信息模块。这一部分主要是处理软件架构，将信息送至设备层。IEEE1451.1标准使用对象模型去描述智能传感器的行为。它支持传感器乃至一定程度的传感器块，这可以看作是输入/输出硬件驱动的提取。支持智能传感器的应用软件可以通过应用程序接口（API）接入到传感器。应用程序接口是一系列标准软件功能程序，像“IO_Read”用于请求具体的传感器电子数据表（TEDS）数据，而“IO_Control”用于设置和重置传感器参数。软件创造灵活的环境和自然的模型，这样就允许工程师从运行的真实系统这一层面去思考，而不需要从程序语言这一层次去思考。这种方式创造了一种面向对象技术，从而使开放式系统变成可能。面向对象系统生产的设备更加容易适应新应用的需求。在这种方式下，可以很容易获得灵活性，这样系统就会很容易被组装、重组或被快速修改；并且传感器也可以很容易地被重构或连接到不同网络。

IEEE1451.2是第二部分，主要涉及传感器、微处理器通信协议（MCP）和TEDS。IEEE1451.2标准为数字信息直接从传感器到系统定义了传感器数据和电子接口，因此创造了一种模型架构。这种模型架构允许在任意现场网络中以自动和透明的方式加入嵌入模型。这一部分建议了一种10线接口，称为传感器独立接口（TII）。其中两根是电源线和地线，另外的线分配给数据输入、数据输出和时钟。一个专有的传感器探测线允许网络应用处理器决定即插即用操作传感

器是否已经插上。中断线允许智能传感器接口模块（STIM）申请服务。触发线用于初始化传感器测量和确定请求行为。

IEEE1451.3 是第三部分，主要用在数据通信上，并且 TEDS 格式用于分布式多支路系统中。

IEEE1451.4 是第四部分，主要是关于混合模式通信协议和 TEDS 格式。IEEE1451.4 建立了一个数据通用系统，数字网络需要这些数据识别、描述、接入和利用模拟传感器中的信号。这一部分的目标是简化安装、创建和维护传感器网络。TEDS 在具体标准中用于自我识别，它通常被放在传感器或加载器的嵌入芯片中。网络需要每一个 TEDS 节点提供的数据来识别设备和解释内存中的内容。TEDS 是用 IEEE1451.4 中的模版描述语言写成的。标准为常用的设备定义了模版，这些设备有加速计、变形测量仪、传声器和热电偶。

任何公司都可以向 IEEE 申请注册他们的设备。IEEE 会在 TEDS 中为这些设备分配惟一注册码（URN）和设备商标识。每一个注册码用 8 位主码来标识设备类型，48 位序列号来标识各个设备，8 位冗余检测码来确保通信完整性。传感器制造商在其制造的每个单元中安装 64 位惟一注册码。惟一注册码的序列号是从 IEEE 注册授权中的 4096 个号中买来的。

IEEE1451.5 是其中的第五部分，主要针对无线传感器通信。这一部分给出了一些详细信息，使得符合 1451 的传感器和设备可以进行无线通信。IEEE 近来正在进行 3 种不同标准的研究——IEEE802.11、蓝牙和 Zigbee。

IEEE1451.6 主要是关于设备运行在固定自动网络（CAN）总线上时所需要的信息。

图 3-13 显示出 IEEE1451 标准中不同部分的关系。IEEE1451.1 处理软件。

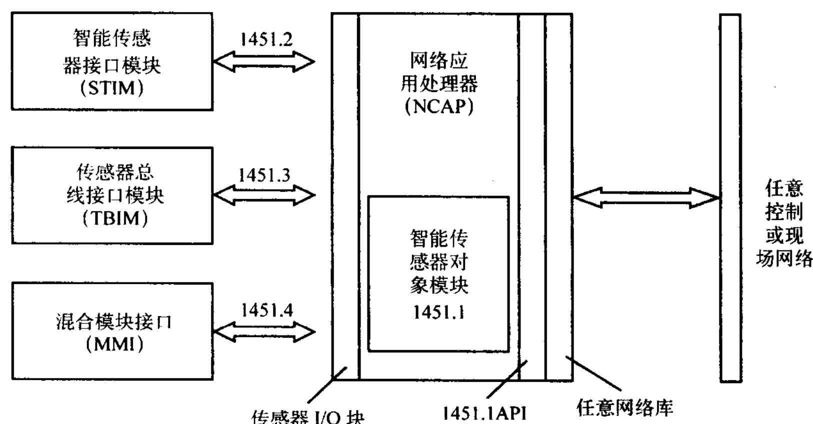



图 3-13　IEEE1451 协议族的关系

其他部分定义了智能传感器连接到网络以及 TEDS 的物理接口和数据格式。

一些好的迹象表明许多公司正着手于 IEEE1451 标准。例如，国家研究所正积极推动和引入符合 IEEE1451.4 的即插即用传感器。当前已有许多遵从此标准的智能传感器可以使用。更多关于这些传感器和 IEEE1451 标准的信息将在第 4 章中介绍。

## 3.6 无线通信网络、PAN、LAN 和 WLAN

无线数据传输和网络受到很多用户的青睐，这是因为它不需要导线，减少了安装及维护成本。另外，还提供了移动性。近年来，无线技术引起了大量商业和研发的兴趣。无线通信网络及相关技术提供了如下功能：

- 易于与现有无线通信网络实现整体兼容；
- 与互联网相连；
- 用户和设备具有移动性；
- 协同工作能力及系统整体性。

当前，无线技术与网络已经应用于以下领域：

- 车间或工厂中的元器件网络；
- 工业过程中的无线元器件应用与控制；
- 不断变化的环境中的无线通信网络，例如野生生物和栖息地的监视；
- 固定和移动设备间的简单通信；
- 互联网和移动设备或用户间的连接；
- 先进的无线互联网接入；
- 将网络接入引入孤立的区域；
- 在繁忙的公共地区，像宾馆，升级用户业务；
- 在无法进行有限连接或有线成本很高的地方实现便利的网络连接；
- 在安装光缆很不方便或很昂贵的家庭实现网络连接；
- 安全通信，如协同局域网；
- 环境监测；
- 医疗事业和病人监护；
- 机械探伤。

当前无线技术和相关网络包括不同的接入技术的层间合并，包括：

- 无线局域网（如 IEEE802.11a、IEEE802.11b、HiperLAN 等）；
- 针对小范围低移动性应用的个人局域网［如蓝牙、红外数据通信（IrDA）］；
- 蜂窝移动通信系统。

本书主要集中介绍基于射频无线通信系统的元器件和网络，因此有必要重讲频率的分配来弄清 RF 网络的运行特征。

### 3.6.1 频谱分配的近来发展

频谱分配是由国家或国际组织来执行的。在美国，一些用于无线单边带或宽带的通用频段是 39GHz 波段，本地多点分布系统（LMDS）、多信道多点分布式系统（MMDS）、免授权国家基础信息设施（U-NII）、900MHz ISM 和 2.4GHz 免授权波段。下面将作简要解释。

拥有 39GHz 波段执照的机构提供了固定通信，包括点对点和点对多点通信。FCC 拍卖了包括 50MHz 对称信道组的 14 个执照，这些信道分布在覆盖全美国的 172 个商业地区（EA）和 3 个准商业地区。

LMDS 为用户提供多种单向或双向宽带服务，如视频节目、电视会议、无线本地环路电话和高速数据传输（如互联网接入）。LMDS 包括多小区分布式系统，这种系统在分配的信道中有返回路径。通常每一个小区包括一个中心位置发送器（网络集线器）、多种接收机或发送机和点对点链路，该链路将一个小区与中心或另一个小区相连。共有 493 个基本商业区（BTA），在每个商业区中，FCC 提供了两种牌照：A 块和 B 块。每个商业区使用总计 1300MHz 频段——其中一块是 1150MHz（A 块），另一块是 150MHz（B 块）。

MMDS 包括多信道分布式业务、多信道多点分布式业务和教学电视固定业务。传统上针对电视信道考虑一种“无线电缆”波段，MMDS 正在进行宽带无线接入系统的实现。这些无线宽带系统准备提供数字业务，如互联网接入、无线城域网和基于 IP 的语音业务（VoIP）。

U-NII 的频带被分配在 5.15 ~ 5.25 GHz、5.25 ~ 5.35 GHz 和 5.725 ~ 5.825GHz 三个频段，这些频段用于一种新的免执照设备，称为 U-NII 设备。这些设备在免授权频段提供小范围、固定点到点、高速率无线数字通信。5.15 ~ 5.25GHz 频段用于室内小范围网络设备。在小范围局域网应用中，功率限制在 200 mW。运行在 5.25GHz ~ 5.35GHz 频段上的设备用于建筑物之间的通信，如校园网。运行在 5.25 ~ 5.35GHz 频段的 U-NII 设备功率控制在 1W。5.725 ~ 5.825GHz 频段用于数千米范围的社区通信。在此频段上，点对点 U-NII 设备允许发送功率高达 1W，全向天线有高达 23dBi 的增益。

900MHz ISM 和 2.4GHz 免授权频带在无干扰免授权的基础上支持扩频。FCC 规章 15.247 节允许在此频段上工作。在无干扰基础上，扩频系统与支持重要政府应用的系统如空中无线定位系统共享频段。

在 20 世纪 80 年代后期，FCC 在 FCC 规章的第 15 部分第一次提供了免执照频段，主要针对工作在 902 ~ 928MHz、2400 ~ 2483.5MHz 和 5.725 ~ 5.825MHz

上的小功率扩频设备。在 1997 年，FCC 扩大了免执照频段，新增频段为 5.150 ~5.350GHz，是为了支持小功率免执照扩频数据通信。这个新增频段称为 U-NII 频段。这次扩展非常重要，因为这体现出为无线通信系统和网络分配更多频谱的必要性，而且也表明需求在增加。扩展是在 FCC 于 20 世纪 80 年代作出的免执照扩频频段分配之后。

### 3.6.2 无线通信网络的类型

无线通信网络的分配取决于网络中无线组成单元的任务、网络的规模和网络的拓扑结构这些因素。当代无线通信网络主要分为三种：

- 局域网——无线组成单元用在一般的局域网中，通常提供不同设备间的连接。
- 扩展局域网——无线元件用于扩展局域网范围以超出常规距离限制或组建能力。
- 移动网络——个人移动设备和用户通信使用的一种无线通信网络媒介，如无线或蜂窝电话系统。

无线局域网和扩展局域网包括特殊组织拥有和控制的设备。移动网络的典型应用涉及到第三方，它提供基础结构用于传输和接收。提供这种设备和业务的大多数公司是一种通信运送者，向它的客户提供语音和数据通信。

无线通信的大规模使用引起了许多无线通信系统和标准的发展，这些系统和标准可以用于许多类型的应用。例如，新一代的蜂窝网使得高速数据通信及语音传输非常容易实现。正在制订的新的标准和技术，给无线通信网络取代光纤网络或固定点间的有线网提供了可能。类似，无线通信网络已经发展到通过使用无线局域网来取代家庭或建筑物和办公室内的有线通信网络。例如，蓝牙标准的飞速发展可能会取代许多家庭或工业设备的连线。

由于无线局域网与蓝牙技术主要是在建筑物内使用，所以只需要使用低功率，并且通常频率不需要使用执照。因为无线 ad hoc 网络的数据传输速率由室内独立设备决定，所以这些免执照网络在无线市场上出现了两个分支。看来无线市场（如在建筑物或工厂内）将变成有执照和无需执照业务之间的战场。

### 3.6.3 无线通信网络的拓扑结构

无线通信网络有潜力取消对这种可见的物理网络拓扑结构的需要。这是其可以得到快速发展的原因之一。无线通信网络可能没有必要去拥有某一特定的与之相关的拓扑结构，它自身的结构就像一种特殊的拓扑结构。尽管 ad hoc 网络的拓扑结构是可能的，但是通常无线局域网需要一个中心设备在这些成员间进行控制和协调通信。在这个方面，大多数无线局域网使用星型结构，即所有

的信号都要经过一个中心集线器。读者可以在第 4 章深入理解关于无线通信网络拓扑结构的内容。

### 3.6.4 无线扩展局域网技术

某种无线通信网络设备将无线局域网扩展到其常规距离限制之外。这些设备如网桥和中继器可以将网络延伸到其覆盖区域之外。例如，典型的无线网桥可以将网络延伸至 4～5km。

当局域网网桥放置在合适位置时，可以连接线上或线外的接点。使用 LAN 网桥就可以不需要那些作为通信载体的从一点连接到另一点的专用数字通信线。用作网桥的扩频无线电、红外及基于激光的设备，现阶段已经可以在商业市场上买到。大范围的无线网桥包括与以太网、令牌网及其他相结合的扩频解决方案也是可以获得的，覆盖范围可达 40 km。

随着无线数据传输速率的提高和世界范围标准的形成，很明显将会出现新的更广泛的无线局域网应用。大量的公司正在探索一个公共无线局域网设想，即一个无线互联网业务提供者（WISP）在选定的地方建立一个范围可达全国的无线局域网接入点。通常，这些已经使用的无线局域网是基于 IEEE802. 11 标准的。

### 3.6.5 IEEE802. 11 无线局域网标准

IEEE802 标准广泛应用于无线传感器和测量设备网络中，因此将作简要回顾以突显其重要性。图 3-14 说明了 IEEE802. 11 无线局域网标准的演进过程。在这些标准中，使用了跳频和直接序列扩频方法。IEEE802. 11a 标准没有在图中显示，它在 5GHz 频段提供 54Mbit/s 的吞吐量。DSSS IEEE802. 11b 标准已经由无线以太网兼容联盟（WECA）命名为 Wi-Fi，该组织推进了 IEEE802. 11b DSSS 无线局域网设备的采用以及生产商间的协作。IEEE802. 11g 开发了补码键控正交频分复用（CCK-OFDM）标准，工作频段是 2. 4GHz（IEEE802. 11b）和 5GHz（IEEE802. 11a)，并且支持公共无线局域网的漫游功能和双频带使用。

图 3-15 说明了由 IEEE802. 11b 标准规定的在 2400～2483. 5MHz 上的无线局域网信道。所有的宽带无线局域网都工作在任意具体指定的信道上，并且由网络运营商在无线局域网第一次组建时分配一个指定的信道。所有的无线通信系统必须在清楚干扰和衰落环境的前提下被设计；谨慎的无线局域网配置指出发射机的放置以及它们频率的分配都必须系统地进行以使干扰最小化。即使无线局域网被放置在一个干扰严重的环境中，当系统处于重载情况下，特殊的接人点布置还是可以对成本和终端用户的吞吐量有显著的改进。这种运营商采用的信道化方法对高密度的无线局域网安装、避免干扰和维持好的性能来说是非常

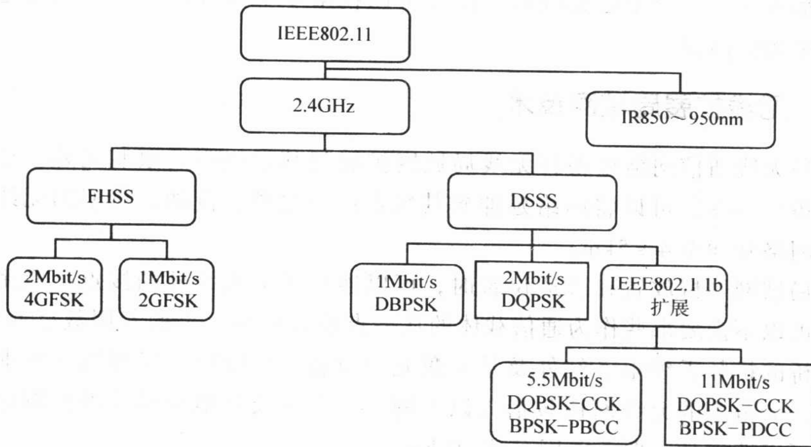



图 3-14　IEEE802.11 无线局域网标准

重要的。

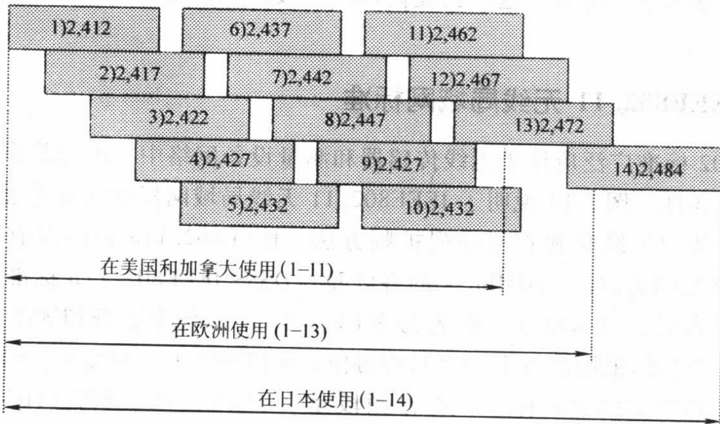



图 3-15　IEEE802.11 在 2400MHz 上的信道化方案

对于无线局域网的配置有许多可用的软件（像 Wireless Valley 的 SitePlanner)。通过使用这些软件，可以在最少的测试和错误的情况下快速地组建无线局域网。这些程序要使用那些要在其中建立无线局域网的建筑物的蓝图，以便预测无线网路运行起来的特征，包括干扰、最佳接入点位置、未来的扩展等。在收集和使用区域内网路性能的测量数据上，有许多其他的无线局域网软件产品（像 LANfielder 和 Sitespy)，这些软件用来确立网络以及获得优化的无线局域网设计。

### 3.6.6 HIPERLAN 标准

在欧洲，20 世纪 90 年代中期发展了一种 HIPERLAN 技术，它与 IEEE802.11 标准功能相似。HIPERLAN 主要应用在欧洲国家。有两种规范：HIPERLAN/1 和 HIPERLAN/2。这两者都已经被欧洲电信标准协会（ETSI）所采纳。

HIPERLAN/1 在 5GHz 射频频段提供了高达 20Mbit/s 的通信。HIPERLAN/2 工作在相同的频段，数据传输速率是 54Mbit/s。HIPERLAN/2 在发送和接收数据，图像和语音通信上与第三代无线局域网是兼容的。HIPERLAN/2 有潜力并且有意愿联合 5GHz 射频频段上的相似系统来进行全球覆盖。

HIPERLAN 主要为计算机通信提供独立的无线局域网，但是此时也被用于许多其他的应用。HIPERLAN 提供 1Mbit/s 和 20Mbit/s 间的异步用户数据传输速率，另外还有速率是 64Mbit/s ~ 2.048Mbit/s 的时间范围信息。设计这个主要是为了能够运行在速度为 35km/h 的移动环境中，并且能在 50m 范围内提供 20Mbit/s 的吞吐量。

### 3.6.7 蓝牙

无线技术有着庞大的用户市场。无线技术提供便利和灵活性。它允许设备之间以及设备与中心控制器间进行协同通信。

蓝牙是一种短距离、小功率、低成本的无线通信标准。它也是一种开放式标准，已经被数千家电器设备（http://www.bluetooth.org/）生产商所利用。一些通用的使用蓝牙技术的设备有蜂窝电话、个人电脑、鼠标、键盘、操纵杆、照相机、打印机、手持音频设备、扬声器和音乐设备。它提供了自组织网络这种方式，可以使得不同的设备在 10m 的常规距离内相互通信。

蓝牙服从 FCC 15.247 部分的规定，并且严格限定了最大峰值功率是 1W。FCC 也规定了 79 个信道中至少有 75 个应该以伪随机方式去使用，而且某一给定信道中在任一 30s 周期内一个设备不能运行超过 0.4s。这些限制也适用于 IEEE802.11b/g 设备，而且它们对于最小化干扰的影响是必须的。

蓝牙运行在免执照的 2.4GHz ISM 频段上。在大多数国家中，有 79 个信道可供选择，然而一些国家只允许使用 23 个信道。每个信道的常规带宽是 1MHz。蓝牙使用跳频技术，跳频速率是 1600 次/s，驻留时间是 625μs。传输发生在 625μs 时隙中，每一个包使用一个单独的时隙。对于长数据传输，一个特定的用户可能会在相同的频段上使用多个时隙，因此必须将同一时间的跳频速率降至 1600 次/s 以下。在轮询模式中，每秒跳变 3200 次而驻留时间是 312.5μs。每一位用户的跳频方案由长度为 $10^{27}-1$ 的循环码控制，并且每一位用户的信道符号

速率是1Mbit/s，采用高斯移频键控（GFSK）调制方式。

蓝牙规范使用TDD和TDMA方式。单一分组的时隙是625μs。所有设备间通信都通过在主从设备间采用TDD方式进行。主设备轮询每一个从设备看它们是否有数据发送。如果有，必须在从设备被轮询到后立即发送。主设备只在偶数时隙传送，而从设备则只使用奇数时隙。在每一个时隙，一个不同的频率信道用作一个跳频序列。

在基带层，一个包包括一个接入码、包头和有效负荷。接入码长度通常是72bit，并且包括设备地址码。包头是18bit长，包括激活成员地址。包头也包含用前向纠错编码的链路控制数据，有高可靠性速率。有效净荷包含0~2745bit。对于同步面向连接（SCO）系统，包必须在长度上占用1个时隙。对于异步非连接（ACL）链路，包可能在长度上占用1个、3个或者5个时隙。

蓝牙规范将蓝牙协议栈划分为3个逻辑组：传输、中间件和应用。蓝牙的核心协议组在图3-16中给与说明。

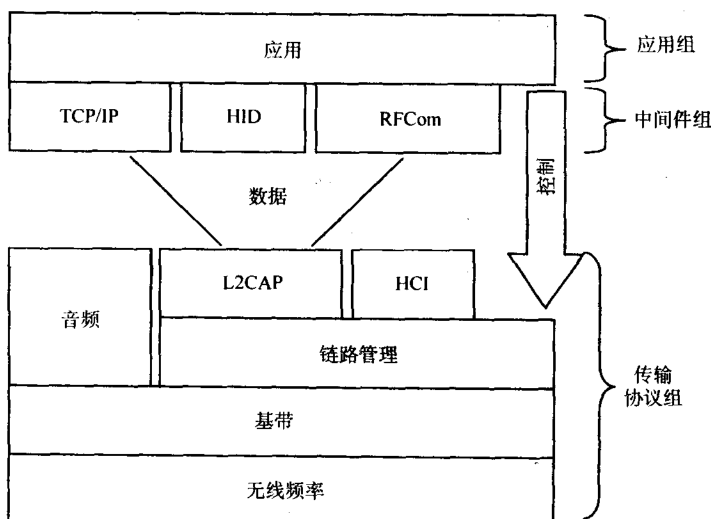



图3-16 蓝牙的核心协议组

传输组协议（等同于OSI参考模型中的数据链路层与物理层）允许蓝牙设备间进行相互定位，并且结合更高层协议与应用来管理物理与逻辑链路层。这一组中包含无线、基带、链路管理、逻辑链路控制、适配层和主机控制器接口（HCI）。

无线层是关于收发器的设计。基带层定义的内容有蓝牙设备如何搜索其他设备以及如何建立连接。在这一层中，进行了蓝牙设备的主从安排。射频通信通过频率跳变序列和TDD来实现。在这一层中，安排了包的传输与重传，用于

错误检测和纠正的包处理步骤与策略，信号的不规则性和加密。链路管理层执行了链路管理协议（LMP），管理设备间的空中接口链路特性。对一般数据的带宽分配和对视频业务的带宽预留，鉴定，设备间的信托关系，数据的加密，以及对内部和射频功率的使用都在 LMP 的控制之下。适配层在较高层与较低层传输协议之间提供了接口。链路管理也负责较高层协议的多路技术，包分割与重装，以及设备间的业务维护。HCI 使层间能够协同工作，并为高层应用接入较低层定义了标准接口。需要这一组中的所有协议来支持蓝牙设备间的通信。

中间件协议组包含第三方和工业标准协议以及蓝牙特别兴趣小组（SIG）开发的协议。这些协议允许已经可得的和新的应用运行在蓝牙链路上。工业标准协议包含点到点的协议（PPP）、因特网协议（IP）、传输控制协议（TCP）、无线应用协议（WAP）以及从 IrDA 改编的目标交换（OBEX）协议。

应用组取决于现有的应用。SIG 开发的协议包含串行端口仿真协议（RF-COMM），使先前的应用能在蓝牙传输协议（SDP）上无缝运行。由 SIG 开发的其他协议包括服务发现协议（SDP）和基于分组的电话控制信令（TCS）协议，SDP 允许设备获得关于相互间可得服务的信息，TCS 协议主要管理电话运营。在制定蓝牙规范中，对现有应用重新使用现有协议和无缝接口提供了最高优先权。

设计蓝牙标准是为了支持在干扰严重的环境中进行通信，并且蓝牙标准依赖于一些前向纠错和编码技术。ARQ 方案支持的信道比特错误速率为 $10^{-3}$。传输的常规距离为 10m，这个距离通过放大器可以增加到 100m。

不同的国家为蓝牙分配了不同的信道。在美国与大多数欧洲国家，使用的是频率跳变扩频（FHSS）2.4GHz ISM 波段。基于蓝牙规范的无线个人区域网（WPAN）现在是 IEEE 标准 802.15。IEEE802.15 目标是互联袖珍式笔记本、个人数字助理（PDA）、蜂窝电话和其他设备。

### 3.6.8 工业传感器总线和网络

工业元器件和传感器系统是建立在适用于工厂自动化、进程控制、家庭自动化和其他应用的通用通信总线和特殊应用传感器总线上的。然而，现代传感器，特别是微型传感器，可以直接连接到电脑和网络上。当系统中不只一个传感器时，可以通过点对点和复用技术来实现这些连接。在一般系统中，点对点连接和复用连接需要大量的布线，从而使这种连接占用很大空间，建立和维护的开销很大。然而，随着无线技术和网络的出现，制造商和用户急切地想在工业环境中使用无线技术。结果，市场上出现了大量的无线工业传感器、控制网络以及融合无线和有线媒体的混合网络。

传感器总线是连接传感器和制动器的最基本设备，它用于向主机传送信息和从主机上接收信息。在这些总线中，传感器数据主要通过系统直接传输，而

不会列队等待。设备级控制网络是更高级的总线，在传送数据到主机之前，它在每个网络节点中执行一些基本数据的处理。现场总线网络合并位于应用层之上的用户层，而且如同在控制器中一样，它在现场设备中也表现出控制进程的能力。总线和设备级网络在提供固有安全能力上是不同的。设备级网络可以和总线联合使用来处理离散的自动化功能，因为它们有高速处理小包信息的能力。设备级网络适合于有限数据的网络和如机器控制和情况检测等的专门运用。

在工业运用中，传感器总线的思想来源于有线驱动传感器控制系统。在一条传感器总线中，一个主机接口在一条双向数字数据控制总线上连接有很多节点，如图 3-17 所示。传感器总线上的每个节点包括一个或多个传感器或制动器。

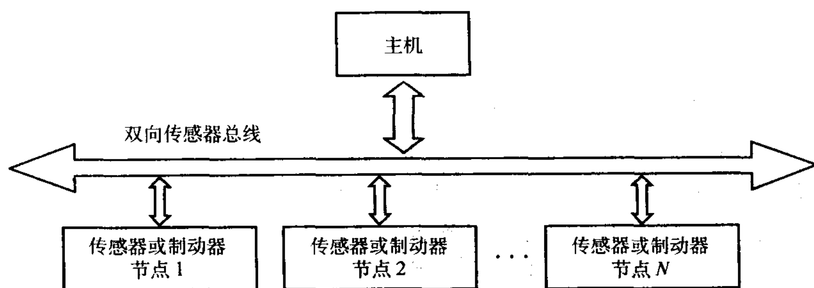



图 3-17 一条基本的传感器总线

一条传感器总线或一个控制网络包括一条通信总线或网络，通过这些总线或网络，大量的设备节点可以连接到计算机上。计算机和设备之间采用标准的协议进行通信，以执行感应和控制或监视应用。节点间的通信可以是点对点的或者主从式的。不管是哪种情况，在计算能力方面，节点的智能化允许分布式的进程开销。一旦使用微型传感器，它们就可以进行本地数据分析和换算，从而只报道重要的信息。

一个基本的传感器总线是密歇根并行标准（MPS）总线。该总线包含 16 条单线，分别是 8 条双向数据线、4 条控制线、1 条地平线和 3 条电源线。另一个基本传感器总线是密歇根串行标准（MSS）总线，它只有 4 条单线。在双线半双工操作上，MSS 和 RS-232、RS-499 的标准是一样的，但它使用单一数据线，而且其协议是为有中央控制的传感器系统而设计的。该总线最多可以容纳 256 个节点。

与 MPS 和 MSS 同时出现的是德尔福特科技大学（Delt University of Technology）发明的 4 线集成的微型传感器（$IS^2$）总线。该总线利用一个主控制器将数据从从设备或节点上输入输出。除了两条电源线外，一条用于双向串行数据通信，一条用于总线时钟。

以下介绍了一些由传感器总线、设备控制网络和网络协议集成的十分复杂

的工业传感器网络：

- ARCNET：非独立的资源计算机网络；运行的最大数据传输速率为2.5Mbit/s。
- ASI：制动器传感器接口；是一个低成本比特级系统，用于处理主从结构上的二进制设备的每条信息中的4bit信息。它在工厂和过程控制环境中的传输距离可达100m。
- BACnet：建立自动控制网络；与其他协议如ARCNET、Ethernet、RS-485和LonWorks结合支持室内网络运行。
- BITBUS：即IEEE1118，具有多任务运行特征，采用RS-485串行链路的主从结构。主机可容纳249个设备。
- CAN：控制器区域网络，也被认为是ISO-11898，使用双绞线、光纤或同轴电缆或射频媒质进行通信，并且提供高达1Mbit/s的可选的波特速率。CAN总线被广泛应用于汽车、货车与其他传输工具中。
- CEbus：用户电子总线；支持10kbit/s数据传输速率，并且最多能够接入61000个节点。支持同轴电缆、红外线、射频、双绞线和电力线媒质。
- DeviceNet：建立在CAN之上且具有面向对象的软件特征，软件主要适用于工业控制系统。它使用4线屏蔽电缆并允许每个网络有64个节点，100m网络的速率为500kbit/s，500m网络的速率为125kbit/s。
- Ethernet：10Mbit/s局域网，主要用于办公和企业自动化。对于处理和生产工业来说，由于Ethernet具有高速、实时的特征和容易获得的电缆设施，它成为了控制和现场网络的强大的竞争对手。
- Firewire：即IEEE1394；连接计算机和外围设备的高速接口。它支持63个最高数据传输速率为400Mbit/s的设备，并用于连接计算机和用户电子设备，如数字照相机和音乐系统。
- Foundation Fieldbus：通过合并WorldFib和Profibus规范的组成单元形成。更多信息可从第1章中获得。
- GPIB：通用接口总线，即IEEE488；用于实验室和工业元器件系统中的具有有限节点的数据获取系统中。
- HART：高速通道可寻址远程传感器；在传统的4～20mA模拟信号环路上提供双向数字通信。
- Interbus S：一个快速传感器数据环型总线。对于数字数据流，它使用RS-422技术，能够处理模拟的I/O系统。在每个网络中支持256个节点和4096个数字I/O。
- ISA SP50：对于过程工业，基于传统的4～20mA标准。
- J1850：对有中等数据传输速率的客车制定的标准，速率为10.4～

41.6 kbit/s。

- LonWorks：本地运营网络；通过定制神经元芯片来执行 ISO/OSI 七层堆栈协议。支持的介质有双绞线、同轴电缆、光纤、射频、红外线和电力线，距离为 500m 时数据传输速率达 1.25 Mbit/s，距离为 2000m 时速率达 78kbit/s。
- Profibus：过程现场总线，即 DIN-19245，包括四部分。第一和第二部分命名为 Profubus-FMS，全面讲述了自动化方面的知识。第三部分即 Profibus-DP，是一个更快速的工业自动化系统。第四部分即 Profibus-PA，用于处理控制。
- SDS：智能分布式系统；一个使用 4 线电缆的基于 CAN 的系统。在工业控制应用中连接可编程序逻辑控制器（PLC）和个人计算机（PC），支持高达 128 个节点且速度为 1.25Mbit/s。
- SERCOS：串行，实时通信系统；使用光纤环路配置且在环上最多能够容纳 24 个节点。
- SERPLEX：一个基于多路技术控制总线的专用集成电路，提供端到端通信和主从通信两种方式。
- WorldFIP：工厂信息协议；基于三层 OSI 参考模型：第 1、2 和 7 层。由芯片级和板级产品支持。

很多这样的工业网络都支持无线传感器和元器件。

## 3.7 网络、数据和信息管理

网络包括许多内连的设备以及这些设备间的通信基础结构。为了支持这些操作，必须完成相关网络管理软件的研发，也必须出台管理计划，这就需要在主机、路由器、打印机、交换机、防火墙等基础设备中认真创造。

**网络管理**

网络管理需要对信息技术系统进行监督，它包括设备和软件的购买，系统的物理分配、安装、配置、维护、升级和服务更新，解决处理中的问题，决定是否满足目标。这是一个已搭建好但仍在发展的领域，特别是在无线通信网络中。系统管理也可以指一系列软件，它们可以使处理自动化，这些处理也伴随着对硬件和软件的监管，包括资产跟踪、软件翻译、性能测量、实时监测、数据备份、容量计划和灾难检测等活动。

所有的数字系统使用软件即程序语言。为了运行一个程序，数字设备把它从存储设备下载到主存储器中，然后中央处理器执行这些指令。程序是由语言组成的，如机器码、汇编语言或高级语言等。有许多的高级语言：Fortran、Cobol、Basic、Algol、Pascal、C、C++、Ada、Java 等。网络管理使用不同等级的软件，包括操作系统、数据处理软件和信息管理软件。

操作系统是很多程序的集成块，用于管理资源和数字系统、计算机及网络的整体操作。它允许系统通过运用中的自动呼叫和服务程序以及连接用户和其他关联设备来监视本身的操作。例如，对于计算机，有很多不同类型的操作系统，其中 MS-DOS、OS/2、Windows、MacOS 用于个人电脑，Unix 和 Linux 用于大型机器。

数据管理是网络管理中必须的部分。数据管理最重要的因素是数据的产生、传输、存储和运用。数据产生的相关设备和技术在第 1 章已经详细讲述了。数据的传输包括适当的通信系统和相关的软硬件支持。数据可以通过电路交换传输，例如在 PABX 系统中，或者通过报文交换、分组交换、信元交换等传输。分组交换是一种流行的方法。它把信息拆分成小的分组，然后以有效的方式将其送到终端。信元交换利用可以在信源和信宿之间很快传输的小的、定长的信元。数据的存储需要十分小心，特别是在识别那些长期相关的数据时。数据在系统中的运用依赖于系统的设计（例如，制造环境中的处理流量）。

信息管理从一个系统变化到另一个系统。信息是由具有真实文字意义的符号构成的。它是表达有用信息的数据。例如，在工业运用中，关于机器的健康状况和安全性的信息是非常重要的。信息的管理主要是指信息以及时的、安全的、易得的、完整的方式产生、存储和运用。

信息管理有 3 个主要要求：信息系统，它可以按照所要求的应用以及可以存储和提供信息的数据库来定义；信息技术，包括硬件、软件和信息系统的通信结构；信息管理，它需要政策，方法，性能测试，处理和数据模型，应用和有组织的信息通信。

信息管理中的政策决定了主要原理、规则和组织中信息管理者的管理方向。方法定义了信息系统技术的原理。处理和数据模型提供了方针、文献资料和翻译任务及信息的执行。信息的运用维持了应用之间的目标功能和互操作性。通信对于提供有效性和做出决定是重要的。

## 3.8 小结

本章着重介绍了无线和有线通信网络。有线通信网络技术已经使用了好多年，而传感器和元器件中的无线通信网络技术相对较新。有线技术中的知识和经验正被直接运用到无线通信网络中。必要时，对像 IEEE802 和蓝牙等新出现的无线技术进行了广泛讨论与回顾。对与无线通信网络相关的协议和标准也作了详细讲解。本章强调了无线通信网络中的安全性问题并讨论了各种相应的对策。

# 第4章　无线元器件和传感器网络

在本章中，有许多地方需结合第1～3章所学内容进行理解。读者阅读完本章内容后，将能够配置各种不同形式的无线元器件和复杂网络。读者将能根据实际应用选择适当的元件，并能够理解无线传感器网络和元器件中的许多重要问题。

前述章节已经指出通信技术的迅速增长已经强烈推动了无线产业的扩张，同时也拓展了很多新的应用领域。推动无线技术发展的主要因素有数字射频电路制造工艺的改进、信号处理理论和应用的发展、新的大规模低功耗集成电路（IC）和其他基础设备的出现。尤其是，新的IC技术能使无线通信设备更小、更便宜、更可靠。在无线通信设备不断普及和多样化的同时，消费者的接受能力和需求也推动了无线通信系统的大规模发展。

除了现代设备的快速发展，IC技术、微机电系统（MEMS）、智能传感器和无线通信技术的进步也使得大规模且低成本的传感器网络成为现实。元器件网络和传感器网络的区别是：尽管两者使用同样的基本组成单元，但元器件有其他一些功能，比如显示和控制按钮。然而，使用能与外部设备直接通信的感知元件是一种新的趋势。这将给传统测量方法带来很多好处，包括大规模密集配置来组建具备更高性能更好容错能力的大规模系统和用ad-hoc网络构建的更具健壮性且成本低廉的系统。

现在无线传感器和元器件以及它们的网络可以由不同方法制造，例如：

- 将无线通信系统嵌入到传感器或元器件中。
- 在现有传感器和元器件中加入无线模块。这种技术使用集成于传感器/元器件的非定制收发器和特定收发器。
- 连接调制器，包括无线RS-232、无线USB等。
- 使用网桥、中继器、网关和数据记录仪。

本章将会举例说明这些无线传感器和元器件的构造以及网络架构。将会再次提及元器件的通信协议，而且会讲解目前已应用于无线元器件和传感器的技术。本章会通过一些实例介绍蓝牙和IEEE802技术的应用，并讨论工业使用的无线传感器和元器件网络。

无线通信网络的优点之一是它们在相关设备中提供不同的通信方式。通信可以是点对点模式或点对多点模式。这赋予网络配置很大的灵活性，并且可以使用相应的优化算法来改进可靠性和适应性。

## 4.1 无线传感器架构和网络设计

半导体 IC 技术促使了智能传感器和微传感器以及由相关软件支撑的数字射频通信系统的飞速发展，使元器件系统增加了许多显著特点，并拓展了很多潜在的应用领域。在元器件网络中应用无线技术并不是新鲜事物，工业领域很多年前就已经在监视控制与数据采集（SCADA）系统中应用了无线元器件系统。另一方面，无线传感器网络是相对较新的技术，主要应用于环境和军事等领域，例如战场侦察、跟踪和环境监测。当前，无线传感器和元器件网络已经应用于很多领域，包括环境观察和监测、栖息地监测、健康看护和其他很多方面。

在配置无线传感器网络时，最基本的工作是决定传输频率。一种选择是使用处于甚高频（VHF）和超高频（UHF）频段的已经获得许可的频段。这些频段需要向美国联邦通信委员会申请，或者从私人工业无线电、蜂窝数字调制系统或者卫星系统等独立服务提供商处获得。另一种选择是使用免许可频段，但这些可在工业、科学、医疗（ISM）频段传输的免许可系统在最大发射功率上有所限制。支持 ISM 频段的相关技术发展非常迅速，为最终用户提供了很多不同的应用。这些技术也鼓励供货商们支持产品的多样性，而这又进一步推动了无线技术的发展。在世界上不同地区使用的 ISM 频段包括 13.56MHz、27.55MHz、303MHz、315MHz、404MHz、433MHz、868 MHz（欧洲）、915MHz（北美）、2.45GHz、5.2GHz、5.3GHz 和 5.7GHz（北美）。

ISM 频段提供了实现的灵活性，但用户应该注意到这些频段上的干扰也比较大。然而，扩频技术和编码技术可以让用户获得满意的可靠性和效率。

### 4.1.1 无线传感器和转换器

现代无线传感器要么是嵌入式设备，要么是使用附加成分的模块化设备。在嵌入式传感器里，无线通信成分和传感器集成于同一个芯片中。在模块化设备中，诸如收发器等射频模块附加在现有传感器外部。

两种方法都是基于由数字组件和 I/O 系统支持的数字 IC 技术。有很多种传感器普遍使用无线感知工作模式，包括 IC 传感器、MEMS、Web 传感器、无线传感器和特定应用集成电路等。本章后续内容将阐述这些传感器和它们的无线工作模式。

IC 传感器是无线通信设备中的核心部分。很多这类设备都在同一个芯片内集成传感器、信号处理和逻辑电路。它们能作为加速计、生物传感器、化学传感器、光学传感器、磁力传感器、压力传感器等。在很多应用场景，IC 传感器装备有数字设备和射频收发器，并能进行无线操作。

大部分无线传感器由硅材料制造。硅的半导体特性使它成为电子工业的基础，硅还有良好的物理特性，这使它成为机械设备的理想材料。它的抗拉强度比铁更好并且几乎有完美的弹性，是 MEMS 产品使用的合适材料。它还有无磁滞特性，且晶体结构非常适于微型精确产品的制造加工。和以前的传统人造设备相比，这些硅微型产品有许多优势：它们的体积一般较小；由于尺度上的精确加工，故性能较高；由于能一批生产数千个产品，故成本较低。

来自 Crossbow Technology 公司（http：//www. xbow. com/）的双轴数字测斜仪是 IC 传感器的一个典型样例。这个测斜仪用于测量静态环境中物体相对于水平线的倾斜角度。为了测量角度，该传感器利用两个微型加速计，一个沿 $x$ 轴方向，另一个沿 $y$ 轴方向。该传感器有一个嵌入式微型控制器和 A/D 转换器。传感器的指令和设置时间都是通过可编程控制的，允许为任何应用进行定制。它带有一个 RS-232 接口，并有一个插件式温度传感器模式，为温度引起的偏移进行补偿。

随着单片机无线能力的发展，MEMS 设备逐渐普及。尽管 MEMS 元件在某些时候不是很稳定（例如，微传感器、微反应器、微电子和微结构），但现在可以用可靠且低成本的方法对它们进行整合。

使用当今的 MEMS 技术，整合无线技术、传感器和电路仍然处于起步阶段。工作在低频段是 MEMS 技术的发展趋势，而传感器对低频干扰的反应可能比较敏感。在以加速计作为感知元件的情况下，将难以解决诸如振动之类的环境条件中的敏感性。

一个无线 MEMS 传感器的例子是 MicroStrain（http：//www. microstrain. com/）公司的加速计，如图 4-1 所示。该传感器有一个三轴加速计，工作于 2. 4GHz，采用直接序列扩频，并使用新的 IEEE802. 15. 4 标准。它在预编程周期内以 1kHz 扫描速率持续发送数据。持续的无线发送模式支持在单个多信道感知节点上的实时数据查询和显示。这个加速计能用于监视倾斜、振动和循环的设备和结构。多个这样的传感器能在大片区域内组成网络，分布在不同的机器和位置。这个设备的支撑软件工作环境装有 Windows98/2000/XP 的 PC。该软件提供一个接口支持所有功能，包括数据记录、擦写、串发、配置、制图、数据文件保存和向导。向导包括加速计校验、自动偏差平衡、增益调整和支持特定用户数据扩展的习惯公式。

可用的 MEMS 是用射频元件制造的。乔治亚理工学院、国防高级研究项目署（DAPRA）、卡耐基梅隆大学、加州大学伯克利分校和其他机构的研究人员已经做了大量关于 MEMS 传感器和射频相整合的研究。2000 年 3 月，MEMS 研究组的一个下属实验室公布了新一代射频设计。

Web 传感器也同样很普遍，因为它们不需要其他中间件支持就能进行 Web

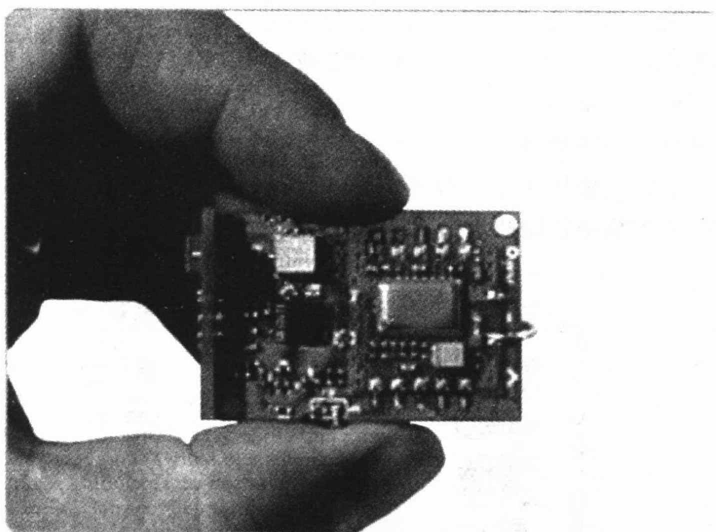


图 4-1 一个基于 MEMS 的无线加速计

连接。当需要远程数据查询时，Web 传感器会特别适用。可接入因特网的传感器内嵌信号调理和 Web 地址，从而使用户可以直接接入传感器或者通过 Web 站点接入。无线 Web 传感器节点的典型配置如图 4-2 所示。

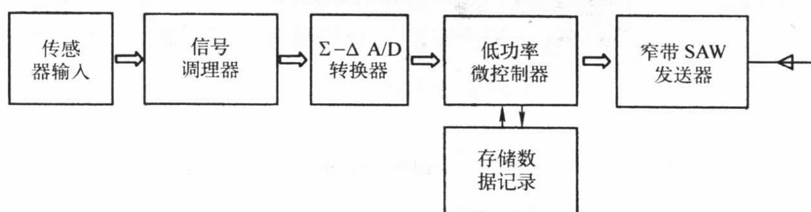


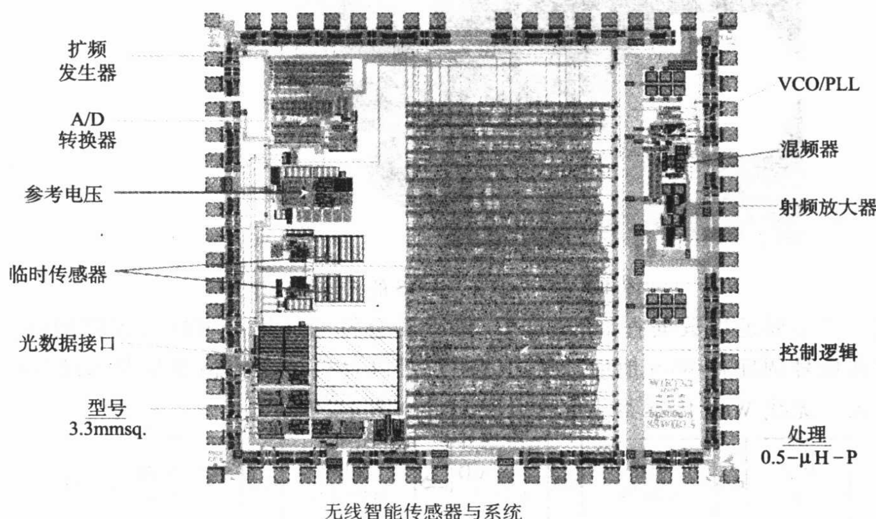

图 4-2 一个无线 Web 传感器

最近几年来，兼容 IEEE1451 的连接因特网和以太网系列端口的 Web 传感器已经研发成功。这些传感器有直接的因特网地址。接口实现于 IEEE451 网络应用处理器（NCAP）中。NCAP 通过以太网连接因特网。NCAP 是一个通信协议，允许使用标准 TCP/IP 端口收发信息。通过 NCAP 协议，感知数据能遵循串行端口的标准格式进行发送。串行端口可以是 RS-232、RS-485、TⅡ、Esbus，或者 IC 互连总线。

Esensor 公司（http://www.eesensors.com/）的 EM01 Web 传感器是一个 Web 传感器的实例。EM01 能监测温度、湿度和亮度。传感器的主要部分是由一个基本单元和两个通信端口（以太网和 Esbus）组成。Esbus 综合了 SPI 总线的网络版本和 RS-232。以太网是连接因特网的路由。基本单元是微处理器，它能够处理因特网协议、通信端口，在某些情况下能处理传感器和传感器信号。Web

传感器没有开关、键盘或显示器，因为它的功能只是作为传感器，而不是计算机。附加的传感器可以通过 Esbus、RS-232 或者 IEEE1451 端口连接基本单元，具体接口类型取决于型号。

智能传感器是先进的微系统，在一个芯片内包含了传感器、接口电路和型号鉴别装置。它们主要用于元器件及应用中。这类传感器一部分用神经网络制造，其他部分使用精密智能技术，如 Fuzzy 逻辑电路和芯片内置软件等生产。智



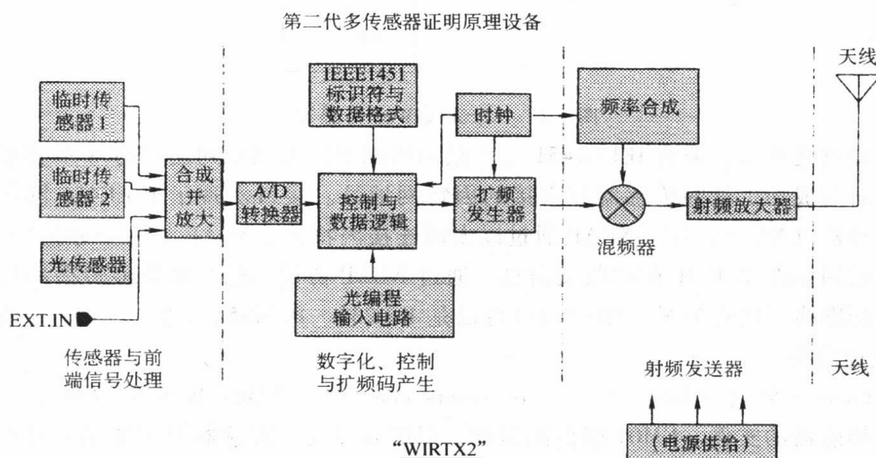




图 4-3 智能无线传感器设计（Courtesy of Dak Ridge National Laboratory）

能传感器有很多类型，包括神经处理器、视觉系统、工业系统和智能并行处理器。

图 4-3 为来自 Oak Ridge 国家实验室的智能无线传感器实例。这是第二代集成无线传感器，具备片内和片外传感器功能。光数据接口提供一个无线接口，使用 TV 遥控器来改变增益、升级数据和其他参数。这些功能表明其正朝完全双向传感器芯片过渡。

另一例子是，一个智能传感器在一个设备中集成了 5 种功能：本地模拟或数字读写感知、4 ~ 20mA 处理信号发送、设置点控制、切换或转变输出、即插即用方式连接地址总线。这些单元可以和 PLC 相接，也可以不需要 PLC，参数可以直接在单元或通过 PLC 设置。不需要系统操作就能直接进行校验计算。

还有很多其他智能工业传感器的例子。比如，一个化学雾传感器经过训练之后，就可以使用人工神经网络（ANN）来学习识别不同的化学品、气体和酸性物质。它可以辨别出空气传播的挥发性有机物、酒精、乙烯、卤烃、一氧化碳、二氧化碳和军事兴奋剂等。某些传感器使用递归神经网络（RNN）学习化学分类。

无线传感器代表完全的微型系统，通过一些外部组件（见图 4-4）的支持，在单个芯片上包含感知单元、信号处理电路和无线通信功能。一些微缩技术可以用来制造无线传感器，包括单片机、MEMS 和专用集成电路（ASIC）。在无线传感器中，一个完整系统需要集成 5 个主要部分：感知单元、信号处理电路、射频电路、电池和封装。通过混合电路、MEMS 或混合信号 ASIC 设计，可以降低射频、传感器的信号处理电路的大小。然而，供电部分需要单独处理。

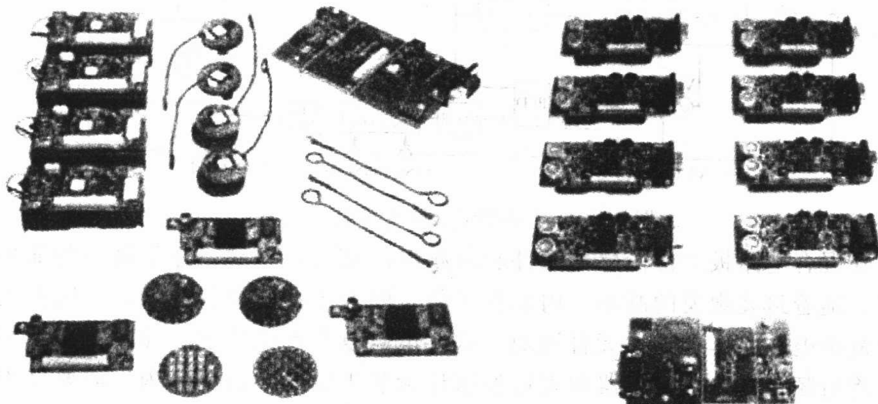


图 4-4　一系列无线传感器（Coutesy of Crossbow Technology，http：//www. xbow. com/）

无线传感器的例子来自于 Crossbow Technology 公司（http：//www. xbow. com/）。该公司提供一系列相互支持的产品，例如 MICA2 Mote 处理

器/射频板、基站和传感器板。MICA2 套件包含 8 个兼容 IEEE802.15.4/ZigBee 的 Mote、传感器数据采集板，还有两个不同的网关/接口板。其他套件包含 8 个 Mote、传感器数据采集板和一个基站。无线套件由端到端软件支撑。XMesh 是一个软件，它支持低功率和自组织可靠网络，在每个 Mote 上运行。XServe 是服务软件，管理数据记录和转发 Mote 网络数据。MOTE-VIEW 是客户端软件，用于监测、可视化和网络管理。除了核心软件部分，还有许多软件工具用于系统开发和无线传感器网络应用的调试。附加软件包括 Surge Network Viewer，用于实时显示的 Mesh 网络性能分析。

使用薄膜混合电路技术或板上芯片技术开发的混合电路可大大降低无线传感器的体积。通过使用集成芯片、微型元件和薄膜混合电路技术，配有表面组装元件的印制电路板（PCB）的体积也可大大降低。图 4-5 显示了混合电路无线系统的功能框图。

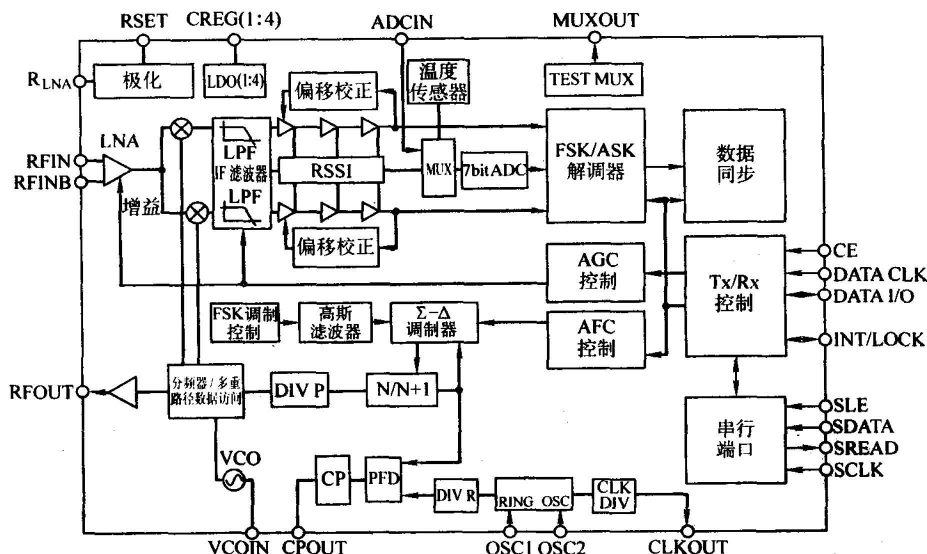



图 4-5 一个典型混合收发器的功能框图

在混合电路板上将传感器元件和射频电路整合在一起，并不是一件简单的工作。随着封装规模的减小，内部各元件之间的干扰问题就会增多，因此需要更多复杂电路以作补偿和元件隔离。这些电路复杂性的增加，导致更多功率损耗。将射频元件、微控制器和模拟加速计封装于如此小的空间内，需要仔细设计和分析。

Analog Devices 公司（http：//www.analog.com/）的 ADF7020 是混合收发器的一个典型例子。该设备是一个低功率中频收发机，工作于免许可频段的 433MHz、868MHz 和 915MHz，符合欧洲 ETSI EN-300-220 或 FCC 15.247 和

15.249 部分的规定标准。工作电压为 2.3 ~ 3.6V，输出功率为 -16 ~ 13dBm，可编程调理，步长为 0.3dBm。接收灵敏度在 1kbit/s FSK 调制模式下为 -117.5dBm，在 9.6kbit/s FSK 调制模式下为 -110.5dBm。功耗在接收模式下为 20mA，在发送模式下为 30mA（输出 +10dBm）。其他特征包括片上压控振荡器（VCO）、N-分频锁相环（PLL）、片上 7 位 A/D 转换器、数字接收信号强度指示（RSSI），温度传感器和正在申请专利的全自动频率控制环。这使得设备能用更低忍受力的晶体。在关机状态下，它的泄漏电流少于 1μA。

与单纯的软件（可编程处理器）方案相反，特定应用集成电路（ASIC）主要提供硬件解决方案。开发混合信号 ASIC 成本昂贵，而且设备对线路布局较敏感。只有当同时处理总量达百万级时，ASIC 才能有效节约成本。混合信号 ASIC 需要外部组件来完善电路，但也在设计和构造上带来灵活性。

有很多超大规模集成电路（VLSI）制造企业，例如 Nordic Semiconductor 公司（http://www.nvlsi.no/）主要生产包括射频/混合模式设备在内的一系列设备。这些公司提供很多 VLSI 产品，例如无线通信的标准部件、高性能数据转换器和定制设计生产服务等。Nordic Semiconductor 公司提供 2.4GHz 的收发器、发射器和接收器产品系列，例如 nRF24XX。该设备是低电流、低电压、工作于 2.4GHz 的 GFSK 单芯片收发器，用 24 针头（24-pin）封装。该收发器采用 0.18μm CMOS 工艺制造，在 5mm ×5mm 范围内包含了所有的电感和滤波器，另外还需要两个外部元件晶体振荡器和电阻来组成完整的射频系统，该收发器目前在接收模式下的最大电流功耗为 18mA，在 -5dBm 发送模式下为 10.5mA。nRF2401A 收发器通过一系列标准接口来配置，数据传输速率范围为 0 ~ 1Mbit/s，并支持频率跳变，频道切换时间小于 200μs，供电电压范围为 1.9 ~ 3.6V。这种收发器有很多种应用，包括无线游戏控制器，PC 外围设备，无线头盔，运动和休闲装备，玩具，射频识别（RFID），远程控制和工业应用，以及互动设备等。

### 4.1.2 无线传感器网络架构

在大部分应用场景中，每个传感器都要各自通过有线连接到一些数据监测设备。用有线连接传感器是一个枯燥、耗时、问题繁多且需要大量人力的任务。由于这些原因，很多公司开发无线解决方案来避免有线传感器的相关问题。然而无线通信网络需要解决一些关键问题，其中包括：

- 必须在物理层建立通信，需要补充无线通信协议来进行数据检测、编码和发送。
- 系统构架必须提供对无线传输的精确控制，这点在通信和数据采集应用中尤其重要。

- 算法必须允许以一种有效且无差错的方式建立网络。

无线通信网络有点到点和点到多点的通信方式。在大型网络中，当很多无线传感器同时工作时，组网需要智能传感器和特定编程算法来使传感器遵从某种形式的层次结构。传感器组网技术在许多方面都取得了进步，包括：

- 用低成本信号处理硬件和软件来开发低成本智能和可编程传感器。这可实现精密探测、识别和跟踪功能，并能和网络中其他设备协同工作。
- 提供更小更轻的封装方法，使传感器耗能低、体积小、工作寿命长。
- 减小传感器之间无线通信的带宽并采用扩频技术，也可提供一些保密数据流，并降低电子噪声或消除第三方引起的干扰。
- 降低整个传感器网络的成本并最大程度地延长传感器网络的寿命。
- 提供自动传感器网络管理技术和算法，例如自动节点选择和自校验。

传感器无线组网是相对较新的技术，在特定应用领域已经取得了很大进展。但是大部分应用还不能在现实中广泛使用。然而，这些应用有一些共同点。比如，无线连接进行原始传感器数据传输、集中数据处理、路由调度、数据传输设计等。随着传感器制造技术的进步和多组织合作的不断增加，现实的传感器网络应用正变得普及。

如何接入网络来共享信息是无线传感器的特色。在这方面，诸如 IEEE1451 之类的标准对支持传感器设计和组网就变得非常重要。然而，很多商家正逐渐认识到传感器网络的重要性，他们也正在推动恰当的解决方案将智能传感器连接到 TCP/IP 网络。最近传感器接口技术至少在两个层上取得了进展：底层接口和高层接口。

底层接口集中于由基站和传感器节点组成的传感器簇的开发，它需要具有 Web 功能的智能传感器，这样就可直接由网络进行连接。

高层接口集中于各类无线通信网络拓扑，例如蓝牙、adhoc 网络、ZigBee（例如 IEEE802.15.4）、低耗电无线技术和嵌入式操作系统。图 4-3 和图 4-4 展现了更多关于这些拓扑的信息。高层接口减小了人为操作对无线传感器网络的影响。两种接口都在学术界和商业界引起了广泛的兴趣。

### 4.1.3　IEEE1451 标准对传感器网络的影响

制造业无线传感器需要设计者和制造者之间的联系和协作，共同遵循国际标准、协议和美国联邦通信委员会（FCC）规范。任何无线传感器标准都要遵从物理层的要求（例如 FHSS、DSSS 和窄带）和高层的通信协议。这些标准定义了通用的无线传感器节点以及它们的结构。很多组织，例如 IEEE1451.X 工作组和蓝牙技术联盟（SIG），正在考虑向统一性和互操作性方面发展。

连接传感器到无线通信网络的一个普遍问题，在于每个传感器设计的独特

性和它们的功能差别。IEEE1451 系列标准解决了这些问题。IEEE1451 定义了功能界限和必要的接口，使智能传感器方便连接到不同网络。

传感器制造商长期以来一直为降低智能传感器和传感器组网的成本寻找方法。目前有很多版本的传感器控制网络或现场总线已经投入了应用，它们各有优缺点。连接智能传感器到不同网络和支持不同协议的成本是巨大的，无论是对消费者还是制造商来说都是如此。因此，传感器接口标准 IEEE1451 在解决传感器的接口和互连问题上非常实用。如第 3 章内容所示，IEEE 和美国国家标准研究所（NIST）都着手于这项研究，在智能传感器和网络接口的不同方面产生了一系列的标准。IEEE1451 标准的一个重要目标是通过使用现有的传感器和组网技术，使传感器制造者更容易开发能与传感器网络、系统和元器件连接的智能设备。

IEEE1451 标准定义了功能界限和必要接口，使智能传感器能容易地集成到系统中。该标准定义了协议和功能，使传感器具备互变性、自我识别和网络依赖性。IEEE1451 的一个关键点是 TEDS，它允许传感器在组网系统中能自我识别和互相改变。使用 TEDS 信息，主机可以识别温度传感器、压力传感器或任何其他类型传感器，也同样能识别测量范围和规模信息。

连接到节点的智能传感器由传感器元件、信号调理电路和一个 TEDS 组成。IEEE1451 标准在 TEDS 里清楚地定义了接口域。这些域中对网络来说比较重要的有修正号（1B）、传感类型（1B）、制造商信息（17B）、传感器模式（17B）、传感器序列号（17B），用户别名（17B）、传感器 I/O（SIO）识别码（2B）、校验类型（7B）和下一个校验日期（7B）。这些域要么直接嵌入传感器，要么包含在外部微处理器系统或被称为串行输入/输出（SIO）缆线的 SIO 设备中。SIO 缆线能为传感器提供电压、电流或电阻输出，也同样能提供电阻温度探测和热电偶。无线传感器网络的细节内容将在 4.3 ~4.5 节阐述。

## 4.2 无线元器件架构和网络设计

元器件的无线通信不是什么新鲜事物。新的现象是新技术的应用（如 IEEE802、蓝牙、调制技术）导致这些元器件的广泛使用。

现代元器件靠许多技术来实现无线通信功能：

- 内嵌无线特性，使无线功能成为元器件的一部分。
- 附加设备或模块，例如收发器。
- 连接调制解调器，例如无线 RS-232、无线 USB 等。
- 使用网桥、中继器、网关和数据记录仪。

值得注意的是，集成射频通信技术正在改变现代元器件以及它们的工作方

式和应用领域。射频集成通信系统正在积极发展元器件和用户，为下一代元器件和测量技术作准备。

嵌入式无线元器件由5个主要部分构成：传感器和信号调理器，可编程数字硬件，存储器，I/O和通信组件，还有其他诸如显示、键盘和电源等组件。一个典型无线元器件如图4-6所示。所有元器件都与图4-6所示的有类似特征，但是它们在处理、发送和显示信号的方式上也存在区别。

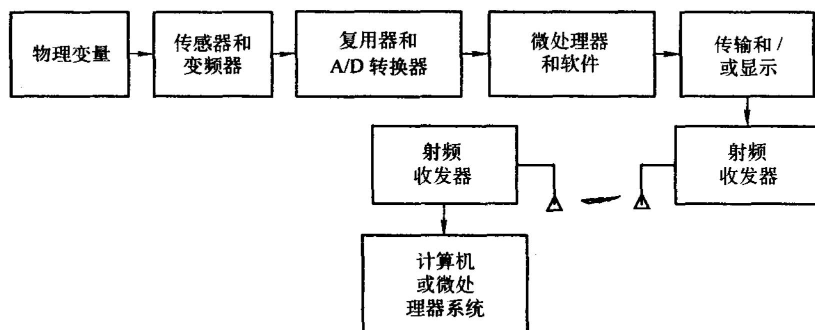



图4-6　一个无线元器件的组成单元

嵌入式无线元器件广泛采用扩频通信技术。扩频射频技术作为有线的一个替代选择，提供可靠性、抑制阻塞特性、结构穿透性、信号敏感度和良好的外部信号范围等。扩频可用于非军事用途，并工作于915MHz、2.46GHz和5.8GHz等频段。来自Axonn（新奥尔良、洛杉矶）等公司生产的带有扩频技术的收发芯片价值从2～10美元不等。这些收发器工作电压低（1.8～5V）。因此，它们的电池寿命可达3～10年。低成本收发器用于分布式系统，例如分布式传感器网络、SCADA系统等。低成本收发器的一个例子是Z-World Engineering（Davis，CA）公司的RCM2200。该单板收发器有一个内嵌TCP/IP的因特网接口来进行高速网络数据发送。RCM2200的固件可以通过编程来支持多类数据输出格式，例如HTML直接进行Web访问。

组合无线元器件使用收发器。收发器是集成射频元件的复杂设备，包括信号产生器、放大器、衰减器、调制、解调、频率复用、功率分配、功率整合和信号处理电路。在无线元器件中广泛使用的收发器有两种典型的例子：

- 飞利浦公司（http：//www.philips.com/）生产的SA1638是一个48针（48-pin）收发器，包含了接收、发送和中频电路。该设备接收模块包括中频放大器、一对正交下行混合器、一对基带滤波器和放大器。在发送端，第二对混合器将正交基带输入转为中频。一个外部压控振荡器（VCO）为混合器提供本地正交振荡信号。再加上分频链路、参考分频和相位探测器，这样就不需要外部中频混合器。接收和发送路径或者整个电路都可通过逻辑输入来关闭。插件

式电压控制器可将3.3～7.5V直接电池供电调整为3.0V输出，电流在接收模式为18mA，在发送模式为22mA。

- CC2420是Chipcon公司（http：//www.chipcon.com/）生产的单芯片收发器。该收发器适用于低功率、低电压射频应用，工作于2.4GHz免许可的ISM频段。这是遵守IEEE802.15.4标准和2.4GHz ZigBee应用的第一批射频收发器之一。该设备基于2Mbit/s的DSSS调制器，有效数据传输速率为250kbit/s，包处理速率在接收和发送模式下都是128B。硬件支持MAC层数据封装和鉴定。功率大小和其他特征遵从EN300 400、FCC CFR 47的第15条例和ARIB STD-T66的规则和标准。目前电流在接收模式为19.7mA，在发送模式为17.4mA。输出功率是可编程的，电压范围为2.1～3.6V

带有适当I/O功能的传统元器件可用无线调制器来进行无线通信。由于很多元器件装有传统通信端口，例如RS-232，它们可以添加诸如无线RS-232、RS-422、RS-485、无线USB等其他设备来升级无线通信功能。很多设备使用诸如IEEE802.11系列标准等不同的技术来进行无线升级。

Airlinx公司（http：//www.airlinx.com/）的DGR-115/115H是与传统元器件集成的升级产品例子之一。它使用扩频数据收发，数据通信最大范围可达30km。通过调频扩频技术，该设备能以115.2kbit/s速率接收和发送非压缩数据。DGR-115/115H遵守FCC的第15条例规则，输出功率为1W。它的操作模式可以是点到点或点到多点模式，通过终端程序选择。也可配置某种模式的中继器，以将链路范围扩展到100km或更远。

另一个例子是MaxStream公司（http：//www.maxstream.net/）提供的XStream独立射频调制器。该调制器传输范围广（30km）、通信功率低、工作于900MHz或2.4GHz ISM频段，适合与USB或以太网端口连接。封装类型为双列直插式封装（DIP），可选择支持RS-232、RS-422和RS-485。它提供的接口速率可达1200～57600bit/s。

网桥、路由器和网关用于传感器和元器件网络中。4.2.2节对它们进行详细介绍，4.2.3节将讨论无线数据记录仪。

### 4.2.1　无线元器件的必要元件

除了传统有线元器件的必要元件之外，无线元器件至少还需要两个附加元件：一个射频设备和一个微处理器。由于它们是无线元器件区别于有线的关键部分，本节将进行进一步讨论。

目前的技术可将射频设备制造成IC。这些射频的IC技术在不断发展和完善。现代射频系统能包含成百上千个电路单元（比如晶体管、二极管和电阻）。

目前，射频市场使用的最主要技术有砷化镓（GaAs）、双极性硅和双极互补

金属氧化半导体（BiCMOS）。GaAs 类设备尽管有功率高、成本高等缺点，但仍占据射频产品的主要市场，特别在功率放大和前后端切换器领域。GaAs 类处理器有一些很实用的特点，比如有更高的击穿电压和更高的截止频率、半绝缘基板、高质量电感和电容。而硅技术则有着更高的集成度和较低的成本。硅技术适用于具有复杂电路的高容量产品，例如频率合成器。几乎所有典型收发器的部件均可用双极性硅技术，并有很多制造商提供这些产品。

GaAs 和双极性硅设备的竞争者之一是互补金属氧化半导体（CMOS）技术，由数字市场的增长来支撑。射频 CMOS 设备都是大规模生产并工作于高频率。CMOS 技术引起了很多研究机构的关注。然而，性能、成本和上市时间是影响技术选择的 3 个关键因素。大量的放大器、混合器、振荡器、混频器和分频器都是由双极性和 CMOS 技术制造。

微处理器是无线元器件的另外一个必要元件。它们控制着整个系统的运作。有很多公司生产用于无线元器件的微处理器，例如摩托罗拉、国家半导体、英特尔、德州元器件、Atmel、日立、Cypress、飞利浦和很多其他公司。出于元器件复杂性的考虑，可以选择的支撑处理器主要有 3 个种类：专用或嵌入式控制器、位片处理器和通用中央处理器。

专用或嵌入式控制器用于相当简单的元器件中。嵌入式控制器的典型例子有 MSP430 系列微控制器（德州元器件）、8 位 MCS51 CHMOS 系列微控制器（英特尔）和 68HC908 系列微控制器（摩托罗拉）。

位片处理器适用于中等复杂的元器件中。例如，MC2901LC（摩托罗拉）、IDM2901A-1DC（国家半导体）、TS2901BCP（汤姆逊）和 N2901-1 I（西格尼蒂克）。

通用中央处理器用于复杂元器件中。通用中央处理器有 80219PCI 处理器（英特尔）、TMS320C54x 和 TMS320C6x 系列 DSP（摩托罗拉）、RM52xx 系列中央处理器（PMC Sierra）和奔腾系列（英特尔）。下面给出部分微处理器和微控制器的技术细节。

Cypress CY8C25xxx/26xxx 系列微控制器建立在可编程片上系统（PSoC）之上。这些模拟和数字可编程片上系统把通用微控制器作为用户模块。一个用户模块具有特定的周边功能（例如计时、计数、脉冲宽带调制等）。它的制造方法是对一个或多个模拟/数字模块进行不同的设置，并为所需功能调整参数。使用 PSOC，可选用对应用户模块来定义所需周边功能。这项工作可以使用 PSOC 的设计软件工具来完成。这个方法的好处是让设计者生产“用户化”设备。这些 PSOC 能通过并行或串行连接来提供不同功能。这些功能包括：

- A/D 或 D/A 转换器；
- 多极滤波器和不同增益；

- 定时器/计数器；
- 串行收发；
- 循环冗余校验（CRC）发生器；
- 伪随机序列发生器；
- 串行外设接口（SPI）。

汇编程序和编译器包括M8C语言汇编器和PSOC设计器C编译器。

摩托罗拉MC9S12DP256微控制器有16位中央处理器。中央处理器由以下部分构成：

- 256KB的闪存式电可擦写可编程只读存储器（flash EEPROM）；
- 12KB随机存储器（RAM）；
- 4KB电可擦写可编程只读存储器（EEPROM）；
- 2个串行通信接口（SCI）；
- 3个串行外设接口（SPI）；
- 8通道的I/O增强型捕捉定时器；
- 10位A/D转换器；
- 8通道脉宽调制器（PWM）；
- 数字比特数据链路控制器（BDLC）；
- 29个离散数字I/O通道（端口A、端口B、端口K、端口E），其中20个具备中断和唤醒功能；
- 集成电路互连总线（Inter-IC Bus）。

汇编程序和编译器是嵌入式Workbench和Image Craft ICC12 V6。该微控制器可以工作于3种模式：正常模式、仿真模式和特定工作模式。

AT91 ARM Thumb微控制器系列是一个32位系统，它的架构基于精简指令集计算（RISC）处理器。微控制器的主要特点有：

- 8KB片载静态随机存储器（片上SRAM），可以直接连接32位数据总线和单周期访问。
- 完全可编程外部总线接口（EBI）可以连接外部存储和特定应用周边设备。
- 8层优先级，个别可屏蔽，矢量中断控制器来减少延迟时间。
- 32位可编程I/O线，用户可自定义该线为输入或输出。这些I/O线可编程控制，在每条线路上可检测信号中断。
- 通用同步和异步串行接收器和转发器（USART），允许用户选择通信模式（例如，异步或者同步）。
- 三通道16位定时计数器（TC），可编程控制，能捕获波形。
- 用以调试进程的三态模式，不需要把设备从目标板上卸下，就能将仿真

器探针连接到该应用电路板上。

- 5 个周边寄存器：控制、模式、数据、状态、允许/不允许/状态。

汇编程序和编译器基于 Multi 2000 开发环境、ARM SDI 和 ADS 开发环境以及 IAR 嵌入式 Workbench。

### 4.2.2 无线网桥、路由器、网关和中继器

当无线元器件数据传输距离超过发送和接收器的范围时，就需要配置无线网桥、路由器、网关和中继器。关于这些设备的更多信息见 3.3.3 节，本节内容主要提供一些实例。

无线网桥提供长距离点对点或点对多点链路传输。某些网桥使用 DSSS 通信技术，而另外一些使用 FSSS 和其他工作于 2.4GHz 频率的技术。数据传输速率可达 11Mbit/s。这些网桥遵守 IEEE802.11b 等标准，将一个或多个站点连接到中心服务器或因特网。

无线网桥的一个例子是 DWL-1800 系列设备，由 D-Link 公司（www.dlink.com）生产。这些设备由两部分产品组成：DWL-1800B 无线基本单元和 DWL-1800R 无线远程网桥。无线基本单元和远程网桥一起提供长距离点对点和点对多点室外应用的链路，它们使用工作于 2.4GHz 的 DSSS 技术，数据传输速率可达 11Mbit/s。基本单元和远程网桥都遵守 IEEE802.11b 规范，将一个或多个远程站点连接到中心服务器或因特网。两个单元都安装有户外使用的集成天线。DWL-1800 系列可用于不同建筑的两个或更多远程网络的高速连接。一般情况下，基本单元 DWL-1800B 最多可支持 128 个远程节点，而 DWL-1800R 最多可支持 1204 个站点或连接。

可应用于室内/外环境的无线路由采用窄带或宽带等无线技术（如 IEEE 802.11g）。宽带无线路由支持更多的带宽，允许更多通信设备同时组网。市场上有很多种路由器，比如 MN-700（微软）、2804WBR（SMC）、WRT54G（Linksys）、F5D7230-4（贝尔金）、M8930LL/A（苹果）和很多其他产品。这些路由器中的大部分都遵守 IEEE802.11g 规范。

无线网关主要用于集中式无线局域网（WLAN）管理和控制。它们的应用范围很广，例如声控系统中的管理控制，连接远端设备和通过 GSM 通信网络提供本地郊区连接。典型的例子有 Bluesocket 公司（http://www.bluesocket.com/）生产的 WG-400 和 WG-1100 系列网关。WG-400 最多支持 50 个用户的同步传输，而 WG-1100 最多支持 100 个用户，编码和非编码的信息速率分别是 30Mbit/s 和 100Mbit/s。

部署无线中继器可以重新产生网络信号，从而扩展已有基础网络的覆盖范围。无线局域网中继器接收来自接入点、终端设备或其他中继器的射频信号

(IEEE 802.11 帧)，并重传这些帧。这样，中继器就能部署于接入点和远距离用户之间，作为用户和接入点之间帧收发的中继。

无线中继器的典型例子是 Ambient Weather 公司(http://www.ambientweather.com/) 的7625 无线中继器。该设备由太阳能供电，最大数据传输距离为1km。在户外视距传输条件下，每个中继器的传输和接收距离可达 120m。在户内有墙间隔的应用条件下，典型距离是 30～120m。

### 4.2.3 无线数据记录仪

无线数据记录仪是一个记录元器件，用于监控和报告各种测量数据，比如温度、相对湿度、光线强度、电压、压力或者振动。大部分数据记录仪都是自供电的，因此当它们在持续记录特定参量时，仍然能保持移动性。由于它们属于独立设备，所以能够用于确认和控制任何所需参量的质量。数据记录仪广泛用于设计远程操作的各种测量中，比如石油和矿物探测、环境监测和天气报道。

数据记录仪有各种型号和各种不同的性能。只有一个基本单元的数据记录仪由一个收发器构成，只具备本地通信或者很短距离通信的能力。由于它们的传输距离相当短，所以收集的信息需要存储并下载到附近的基站，如同实验应用的情况。多信道数据记录仪可长距离工作，一部分使用卫星通信系统。它们可以与远程多传感器阵列建立连接。

数据记录仪的一个例子是集成射频收发的单芯片设备，如图 4-7 所示。它收集来自于机载三轴 MEMS 加速计的信息，并把信息发送给本地接收机。该设备发送频率是窄带 916MHz。射频通信链路符号速率为 19200bit/s，该设备能激发一个样本进行记录（一般距离为 30m）或者请求数据传送。设备内置闪存（一

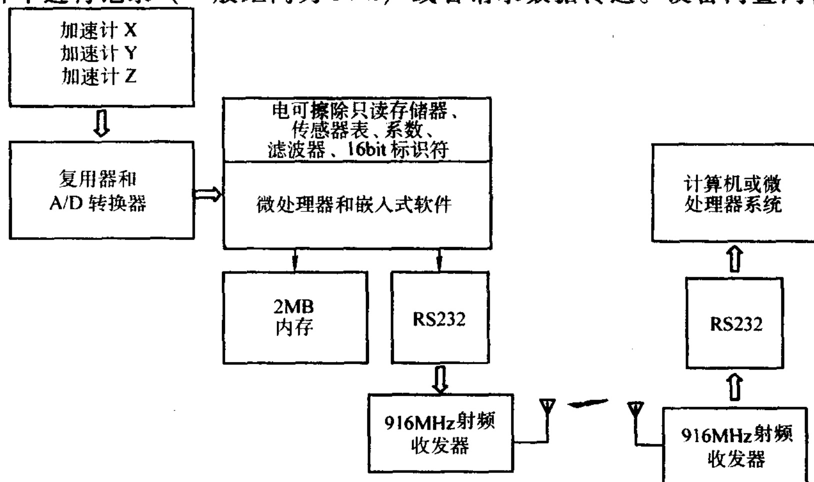



图 4-7　一个典型的数据记录系统

般为2~8MB)。无线通信网络的节点一般会分配一个16位数据，因此能够给数千个多信道传感器簇分配地址。这个数据记录仪供电电压是3.1~9V，使用AA型号锂电池。电池电流在满负荷情况下大概是10mA。该设备包含10位或者12位A/D转换器。整个封装大小是25mm ×40mm ×7mm。

长距离数据纪录仪的一个例子是 Wireless Applications 公司（http://www.wireapp.com/）的WM2M。该设备能使用有线或者内嵌GPRS无线连接。它可以在850MHz、900MHz、1800MHz的GSM网络中提供短消息服务（SMS）和电路切换数据（CSD)。它使用16位微控制器并允许C语言编程实现某特定功能。

在其他类型中，诸如 Microwave Data Systems (http://www.microwavedata.com/) 等很多公司提供即插即用和长距离数据记录仪。典型的产品提供点到点和点到多点数据通信，频率为200MHz~2.4GHz，速率可达8Mbit/s。这些设备用于人类健康监测和其他民用方面，也可用于军事和工业用途。低成本无线传感器网络使得应用大量传感器节点来监测高楼和其他建筑物成为可能。

### 4.2.4 无线元器件的功率考虑

在无线元器件和传感器中，可靠并持久的电源非常重要。低质量的电源会显著限制设备的工作寿命和可用性。在设计和制造时，由于电源有很多不同类型，因而会有一定范围的电源类型可供选择。电源包括化学电池、射频能量、振动能量、太阳能、热差、AC/DC电源等。低功率源比如太阳能、光电、热差、热电、振动能量和压电式，它们用于设备功耗很低的情况。例如，射频电源对RFID产品非常适合，但距离和带宽受到限制。使用AC/DC电源极大限制了无线通信系统中的移动性。基于这些原因，制造商大量生产化学电池。

电池是存储化学能量并将之转化成电能的电子化学设备。对于很多无线元器件，选择正确的电池非常重要，因为它们是惟一电源。所有的电池都有以下特征：

- 它们的寿命有限，并且使用方法决定其寿命。
- 电池使设备可以孤立，并无噪声操作。
- 电池的输出功率、容量和端电压依赖于温度，它们随着温度的提高而提高。
- 由于存在内部阻抗，当前负载很重时，极电压会下降。
- 输出电压随着使用时间的增长而下降，这可以归结为电池内部化学物质和电极的腐蚀。
- 电池的负载过量时，会导致发热。当有大量负载时，某些电池，比如锂和镍镉电池，会永久性受损。

- 不同电池内部阻抗的数量有所不同。锂和镍镉类型内部阻抗较低，而锌-碳类型内部阻抗较高。

电池可以分为不可充电池和可充电池。根据使用材料和化学处理方式，两类电池可分为很多种不同类型。锂电池由于相对其他类型具有更好的性能而广为人知。在 3.3 节电压输出模式下，锂电池具有高峰值输出、低泄露、低重量、高能量浓度、高性价比和很少的记忆效应。对于可充电电池，锂离子和锂-亚硫酰二氯类型表现出了优异的性能。

可充电电池应用于需要频繁更换电池的情况，如便携式电脑。在可充电电池中，锂离子和锂聚合物表现出良好的能量浓度、良好的峰值电流、低重量、高电压和很少的记忆效应。锂聚合物更加耐用和环保，但也十分昂贵。锂聚合电池能以各种大小和形状来生产。镍镉和镍氢电池的性能较差，因为它们有高泄露、高重量、低能量浓度、低电压和高记忆效应等特性。

在无线元器件中，不可充电和可充电电池都有明显的优缺点。对容量、能量浓度、充电服务寿命、存储寿命和充电速率都必须加以考虑。电池容量是它提供的可用能量的总和，通常用 A/h 来衡量。容量在电池和可充电系统中是个重要因素。存储寿命是指把电池存放起来直到泄露大量能量从而不能正常工作的时间，通常到一半容量时就不能正常工作。由于所有的电池内部都会泄露电流，所以它们的电压是随着时间慢慢降低。这种现象在可充电电池中尤其严重。能量浓度是用每个单位体积或者单位重量的瓦特小时数来衡量的电池总能量。电池浓度取决于电池的大小和重量。连续的和瞬间的放电速率表明在各种条件下电池能够提供多少电流。这些放电速率会受到单元极化作用的限制。单元极化作用会导致化学物质如气泡的积累。这会导致电极的反作用，从而增大了电池的内部阻抗。在有些情况下，电池持续供电时所产生的热量可能也会影响瞬时放电速率。

电池有各种大小规格。它的大小与设备的功率消耗和工作需求直接相关。为了高效利用电池有限的能量，必须形成以电池消耗为首要因素的传感器电子设计和工作方法。从电池的角度来说，仅仅靠增加与现存传感器网络的无线连接并不能解决问题，因为无线电电磁波的传输会消耗大量的能量。

能量管理在无线传感器与元器件应用中非常重要。电池有限的能量需要仔细的规划才能得到高效率的利用。为了使能量高效利用，应该采用优秀的电路设计和先进的电池管理方案。通过选择合适的元器件并采用待机模式（Standby Mode）和任务循环（Duty Cycle）等方法来提高效率。与没有采用时间管理的工作模式相比，采用时间管理的工作模式能够使工作时间延长数十倍到上百倍。能量管理中需要考虑的问题有：

- 常规及特定工作条件下的平均和峰值电流损耗。

- 各种电路的驱动电压。
- 设备全功能工作所需最小允许电压。
- 电池充电与更换的频率。
- 电池的充电时间（这在需要连续测量的应用场合中很重要）。
- 可互换电池包的使用。
- 元器件保存期（该元器件在仍能完全正常工作之前能够保持未使用状态的时间）。
- 正常工作时的外界温度范围和极限温度下元器件的反应。
- 重量、大小以及费用限制。
- 元器件内的电池充电器及其成本的影响。
- 对可能影响元器件性能的特殊情况的预测，如强光、强电流、电磁场等。

在无线元器件及传感器应用中，可以通过采用适当的技术来延长电池的寿命。延长电池寿命在很多情况下都很重要，尤其是在考虑对电池进行充电和更换所需费用时显得更加重要。例如，假设由1000mA锂电池供电的无线加速器待机电流为3μA，工作电流为16mA。需要能量消耗的元件包括传感器、信号调理器、微控制器、存储器和收发器。为了满足这些要求，电池的待机寿命应为38年，但这是不切实际的，因为这个寿命已远远超过了电池的保存期。在频繁使用的情况下，化学电池的寿命通常为3年。

下面来看看这个特定系统的工作需求。假设传感器能够工作9000次，每次持续20s。如果传感器每天监视8次，则电池预期寿命为3.08年；如果每天监视4次，那么预期寿命为6年。

当对无线元器件特定工作情况下的电池寿命进行评估时，需要考虑到网络传输和物理层的可靠性。由于错误和冲突导致的额外传输将会使电池寿命大大缩短。相比之下，如果传感器持续工作，它只能工作50h（2.08天）。为达到最好效果，无线传感系统应能够对系统的能量波动进行周期性检测，同时对电池的能量进行持续跟踪。

### 4.2.5 无线元器件的其他问题

无线元器件的通信基于两种级别。第一种是基于传感器级的通信，它发生在元器件内部元件之间；第二种是基于元器件级的通信，它发生在该元器件与外部设备如对等元件、电脑或者网络控制器等之间。现代无线元器件通信主要有两种方法：射频（包括微波）和红外。

射频元器件通信在需要高数据吞吐量的场合如以太网、Wi-Fi和蓝牙等技术中获得应用。这些技术允许用户通过现存的基础设施（通过基站和接入点），在传输中利用高带宽的灵活性，在几米到几十千米的范围内提供网络覆盖。

红外通信技术也有应用的场合，特别是在短距离通信中。例如，在一些放射量测定器中，电子读取器和测定器间的信息交换是通过工作在 RS-232 接口的红外通信实现的。当测定器放置在读取窗口，红外发射器根据交换协议在微处理器的控制下产生信号。通过使用适当的软件，操作者就能够注册测定器，将测量历史记录从存储器传送到个人电脑同时存储在数据库，观看数据库中的历史记录，传送数据并计时以及传送门限值等。

红外通信主要需要考虑可靠性、协议实现和应用规范。其他的问题还包括费用、能量要求、能量效率、传输距离、设备接口和 FCC 规则的兼容性等。毫无疑问的是所有设计都必须折中考虑性能、费用、大小和能量消耗。下面将对这些重要问题中的一部分进行讨论；能量问题将在 4.2.4 节进行讨论。

显然，通信可靠性是一个重要的问题，因为两地之间的信息传输必须安全到达。在无线通信系统中，可靠性是通过现代调制技术、扩频技术和有效的加密/解密技术来实现。无线元器件网络必须在射频干扰（如发动机、照明及其他噪声产生系统）存在的的情况下也能正常工作。大多数射频噪声由窄带信号及随机电磁干扰（EMI）的脉冲引起，它们是由背景噪声和射频通信系统产生的确定性电磁干扰产生的。即使恶劣环境会导致可靠性降低，也必须百分之百的保证信息会在适当的时间内传输完成。此外，还必须保证信息中的错误能够被检测出来并得到纠正。丢失或损坏的数据被视为错误，这种错误会导致元器件产生错误信息。数据包之间的冲突以及由其他通信系统或源引起的干扰也必须加以解决。

元器件射频通信的协议实现力求简化，它只采用了 OSI 协议栈中的几层。首先，系统从物理层开始设计，这也是实际射频电路所在的层。适用于元器件的无线通信系统的设计采用很多物理层、通信协议和应用层的结合。在物理层的上端，根据 OSI 模型的较上几层来设计通信协议，这几层规定了信息的封装、路由、加密以及错误检测和矫正。最后是应用层，它定义了通信协议所允许传输的信息以及接收到从其他信息中抽取的信息后所进行的操作。图 4-8 展示了 OSI 参考模型中相关层的简化结构。

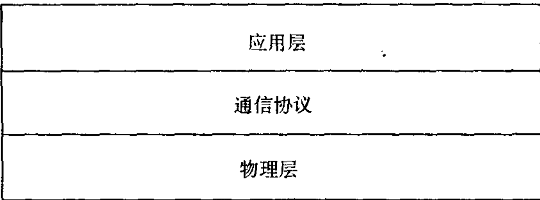



图 4-8　数字无线节点的分层结构

可供物理层选择的有窄带技术和扩频技术。适当利用这两种技术都会产生令人满意的结果。窄带系统可以被分成两类：采用单一频率和采用多种频率。在多数工业环境中，一个精心设计的采用多频率和空间分集的窄带射频系统都能很好地工作。如第 2 章所讨论的，扩频系统主要有

两类：FHSS 和 DSSS。扩频技术通过将传输能量分配（跳频）到高带宽内来提高传输的可靠性。FHSS 的跳频速率必须低于比特速率；但对于 DSSS，跳频速率可以大于比特速率。通常情况下，扩频系统比同等窄带系统能够提供更好的物理层性能，但这要以增加费用、系统规模和电池消耗为代价。表 4-1 给出了不同物理层解决方案的相关性能指标。

**表 4-1 物理层射频解决方案的相对性能**

| 物理层 | 成本 | 规模 | 耗电 | 范围 | 接口排斥 |
|---|---|---|---|---|---|
| FHSS（蓝牙） | 中等 | 中等 | 中等 | 小 | 中等 |
| DSSS（IEEE802.11b） | 高 | 大 | 高 | 大 | 高 |
| 窄带 | 低 | 小 | 低 | 中等 | 低 |
| 多频窄带 | 低 | 小 | 低 | 中等 | 中等 |

处理增益是扩频传输的一个潜在优势，它能够改进接收机的灵敏度，但这以额外的电池消耗为代价。然而，几乎无线通信网络中所有的扩频系统都是 FH-SS（如蓝牙），这种技术跳频速率较慢以致无法从处理增益中获益。DSSS（如 IEEE802.1）也会受益于处理增益。

在很多采用多节点的应用中，通过节点的空间分集可以改进信号的传输与接收。空间分集是指合理摆放收发机并采用多天线。空间分集在窄带和扩频系统中都很有用。例如，窄带接收机的简单多天线设计因为消除了多径干扰的影响从而大大改进了空间分辨率。现代多天线系统通过波束成型技术为接收机提供方向性增益。

在美国，所有的许可频段和免许可频段的传输都必须满足 FCC 指南。由于授权者制定的制度障碍使得许可频段的工作对大多数用户来说都是不切实际的，从而使免授权频段在任何时候都受到用户的偏爱。工业应用中，ISM 频带（902 ~928MHz 和 2.400 ~ 2.485GHz）满足免许可频段的工作需求。在 ISM 频带内，窄带工作的放射功率被限制在 1mW，而扩频传输允许 1W 的传输功率。高频率提供高信号带宽，但低频率在反射普遍存在的多径环境下能够提供更好的性能。

无线元器件中应用规范很重要。例如，许多工业无线通信网络必须允许数千个传感器在单个边界空间内共存。如第 2 章中所讨论的，存在多种不同技术可以保证可靠共存，如 TDMA、FDMA 和 CDMA 等。其中 TDMA 的电路费用代价和复杂度最低，然后依次为 FDMA 和 CDMA。在 TDMA 和 FDMA 中，通过时间和频带的不同来区分多传感器的通信。在 CDMA 中，只要保持较高扩频码片速率，就可以同时进行多个信道的传输。

为了改进通信系统，有很多可能性方案。然而，任何改进的设计都必须折中考虑性能、费用、规模及功率损耗。这种折中对于无线传感网络非常重要。例如，CDMA 扩频可以达到可靠的数据通信，但却以极大地增加费用、规模和

功率消耗为代价。另一个解决方案是较低可靠性的物理层设计，但通过改进的通信协议可以达到近似的可靠性。

在很多应用中，设备的连续多路接入并不是必要的。例如，对于具有 256 个传感器的小区，其中每个传感器每天工作 8 次，每次工作持续时间为 5s，所有元器件的总空时为 2.84h/天或者仅仅有 12% 的负载。FDMA 和 TDMA 在这些环境下都是可行的。

窄带通信如果同时采用多频率、空间分集和精心设计的通信协议，则可能在满足费用、规模及功率消耗等要求的情况下也能达到增强的效果。在这方面，节点间信息流不严格的时效性要求也能起到改进系统的作用。

## 4.3　无线传感器和元器件网络设计

在过去几年里无线传感器网络因为其在科学、军事和商业的潜在优势而获得了广泛关注。这种网络由工作在射频上的一系列节点组成。每个传感器网络可能由一个或多个传感器组成。节点可能只简单地做基本的测量，或包含大量数据和信息的复杂测量。所有节点都必须具备一定的数据和信息处理能力，同时必须受到本地控制器的控制。在很多应用中，互相独立的传感器产生局部判决，然后将这些本地判决结合起来产生全局判决。在分布式结构中，各节点的局部判决有很多结合方法，如为每个传感器节点提供判决反馈功能或者使用基于判决反馈机制建立的完全互连的传感器网络。

在大多数的应用中，无线传感器网络主要是以数据而不是以地址为中心。也就是说，查询时直接获得包含一簇传感器的区域而不是这些传感器的地址。考虑到簇内传感器所获得的数据的相似性，数据合并将会在局部进行；也就是说，簇内的合并节点事先对数据进行压缩或分析，从而减小对通信带宽的需求。数据合并增加了精确度并利用冗余数据补偿节点失败的通信。传感器网络的簇层次结构使得网络具有可升级性、健壮性、高资源利用率和较低功率消耗。

无线传感网络的设计是一个精细的过程，它包括：

- 节点和控制器的嵌入处理器的选择；
- 存储器要求及存储器的有效使用；
- 通信技术与协议；
- 可升级结构和编程模型；
- 信息路由和路径搜寻；
- 网络层的健壮性；
- 实时操作；
- 数据的安全及完整传送与接收；

- 数据存储、数据合并及错误处理；
- 延迟和丢包；
- 控制和网络指令；
- 协同信号处理；
- 健壮性及安全性；
- 能量和资源管理，包括功率效率及应用层和网络级的功率感知效率。

实时无线传感器网络需要克服错误、延迟和信息丢失的影响。在无线传感器网络的设计过程中，从软、硬件方面综合考虑上述各因素是至关重要的。对其中的部分问题，本章后面的章节会给予解决。

分布式传感器网络的拓扑结构包括两种类型：功能性层次结构和非集中式结构（平面）。根据应用需求来决定采用层次结构还是平面结构。两种结构各有优缺点。平面结构的存活性更强是因为它不会因为一个节点而失败；另外，该结构使得节点间有多条通信路由。层次结构使得网络管理更加简单并能进一步减少传输。然而，让传感器网络具备合适功能的第一步是确定它的拓扑结构。这一点是必要的，因为传统的路由协议都需要根据拓扑信息来进行初始化。在许多应用（如蓝牙）中，尽管网络最开始处于平面结构，但它会以层次结构自

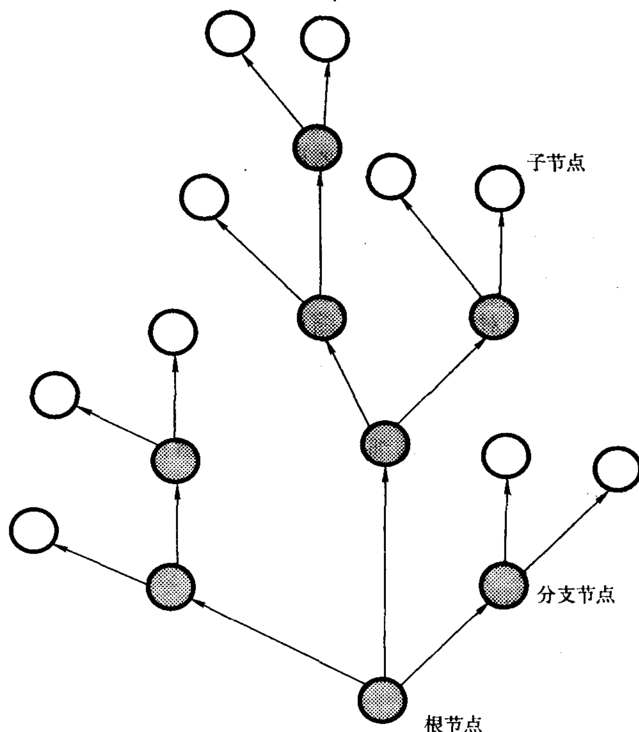
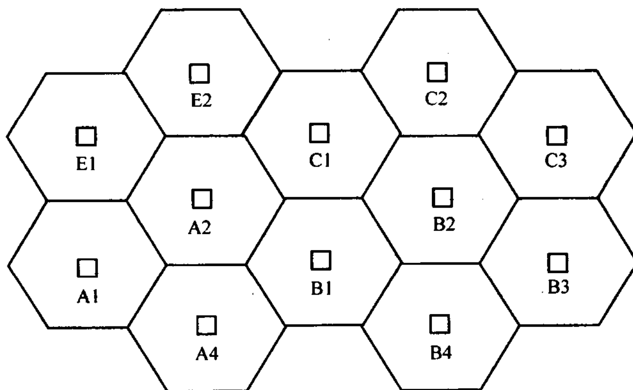



图 4-9 树型结构的传感器网络

行组织成树型拓扑结构，如图 4-9 所示。

通信健壮性取决于网络结构。若以网络费用为首要考虑条件，那么将偏向于功能层次结构，是因为这种结构只需要较少的网络传输。然而，如果网络健壮性是首要考虑问题，则非集中式结构将会是更好的选择。

无线工业元器件网络有相似的平面和层次结构。另外，在大多数工业环境中，元器件被固定在某个位置并可以象蜂窝电话网络一样通过划分蜂窝单元组网，如图 4-10 所示。基站通常位于六边形蜂窝单元的中心。为了提高网络通信效率，蜂窝单元也能以簇状分组。




A,B,C,.... 小区簇和1,2,3,.... 频率组

图 4-10　无线元器件的小区以及小区簇的分配

基站的蜂窝和超蜂窝分组能够部分解决通信频率带宽受限的问题。同一频率类型的空间划分和减少传输功率能够减少使用同一频率的其他设备的干扰。特殊安排如将基站放在 3 个蜂窝单元的交叉点上和使用定向天线（120°扇区）能够减少单元数目。另外，并不是服务区的所有单元都有相同负载。在居民较多的区域应使单元小区较小，以允许更多用户接入。

## 4.3.1　移动无线元器件和传感器网络

术语“移动”在过去被用来描述任何在工作时可以移动的无线终端。近年来该术语用来描述附属在高速移动站台（如蜂窝移动通信系统）上的无线终端，而“便携移动”是指移动用户手持的便携无线终端。便携设备是靠自身电源供电并可以用于任何地方而不需要外界电源。移动无线元器件是指具有无线通信功能的便携元器件。便携元器件可以在移动时进行测量和监视任务并能够发送和接收信息。

图 4-11 展示了一个可用于无线元器件传感器网络的无线通信系统。该系统

包含一个基本单元和移动发射器、接收机。该系统采用全双工模式，即发射器和接收机分别工作在不同的频率上。因为发送和接收采用了不同的频率，这使得发送和接收可以同时进行。这些系统采用数字安全编码扰码，以防止临近设备的干扰。

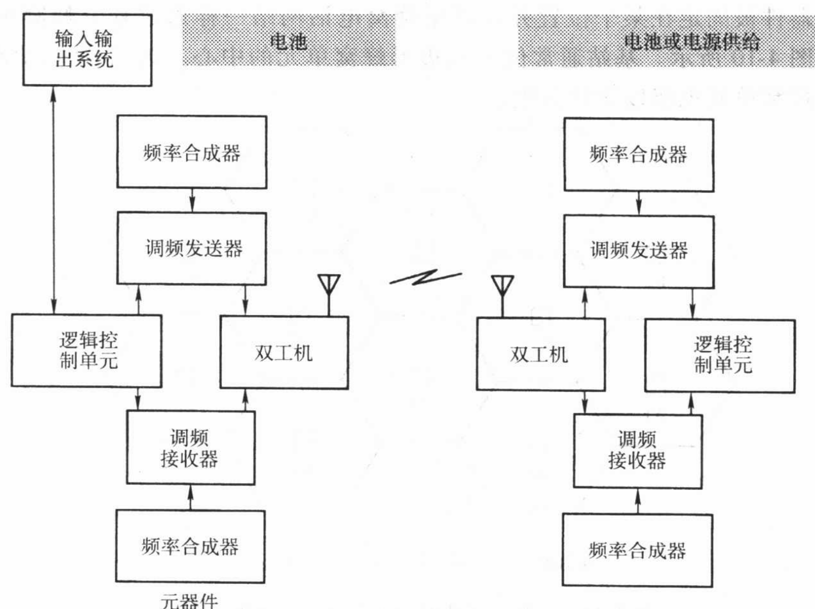



图 4-11 一个典型的无线元器件结构

移动无线传感器和元器件网络是平面传感器网络结构的一个很好的例子，通常也叫做 ad hoc 网络，如图 4-12a 所示。在移动系统中，传感器以 ad hoc 模式在点与点之间移动。如图 4-12b 所示，随着传感器位置的移动，网络拓扑结构也随之发生了变化。这就需要网络周期性地更新。为了使网络拓扑能够重新配置，路由协议必须能够应对这种变化。大多数 ad hoc 路由协议可以被归为两类：反应式和先应式。反应式和表驱动路由协议通过周期性交换控制信息来维护可能到达目的节点的路由。另一方面，先应式和按需的路由协议仅仅在需要时才建立路由。采用哪种路由协议取决于具体的网络实现算法。另外，通信进程的介质访问机制必须与拓扑结构相适应。以传感器 9（见图 4-12）为例，它与传感器 S5 和 S6 通信时需要建立与 S2、S6 和 S5 的新的链路。在重配置过程中，链路参数如调制类型、信道编码数和传输功率必须是相适应的。除此之外，还需要灵活的分布式检测和估计算法。

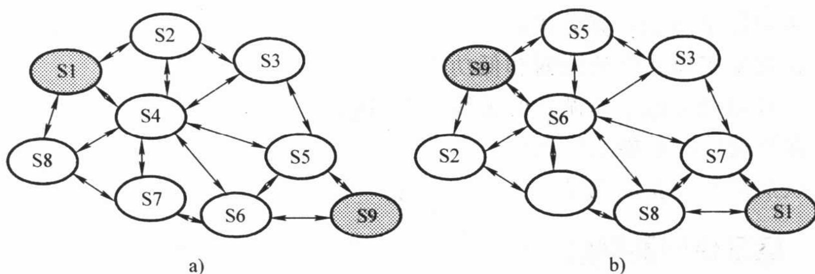



图 4-12　一个 ad hoc 传感器网络

## 4.3.2　无线传感器网络的能量问题

无线分布式传感器网络可能由分散在重要区域的成百上千个小传感器节点组成。每个节点收集数据并与其他节点共享与该数据有关的信息。整个网络是基于协作、免维护和容错这几个方面来设计的。通常节点以能量高效性的方式工作，这种高效性使得节点以尽可能少的能量优化计算和通信。在能量为关键因素的应用中，所有级别的通信包括物理层、链路层及应用层都必须以能量高效性为目的进行配置。为了达到这个目标，需要有一个总的系统方法来设计高效的、可靠的和自供电的传感器网络。待机能量泄露和启动能耗等问题也在考虑之内。

通过微传感器可以实现一种无线传感器网络。微传感器节点将感知、处理和通信子系统集成到一块芯片或单个较小的电路板上。设计时，可能有多种选择。例如，工作节点可以使用低功耗的工业现有（COTS）元件。图 4-13 给出了基于 2.4GHz 蓝牙标准的、自供电的采用 COTS 传感节点。

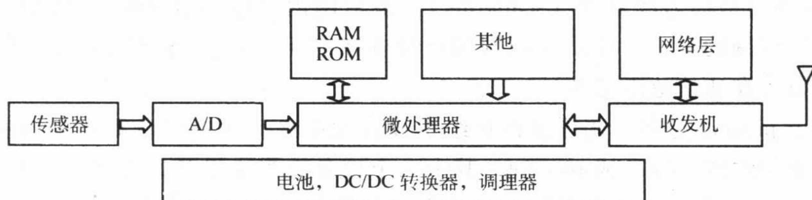



图 4-13　一个商用的非定制传感器节点

微传感器的能量分散问题很重要，能量的高效性可以通过多种方式实现，包括：

- 通过工作系统控制关闭非激活的元件；
- 处理器核心采用动态电压和主频；
- 使用好的处理算法；

- 采用能量感知计算方式；
- 控制空闲模式电流泄露和低功率调制；
- 设计可调和低工作循环的无线功率传输；
- 多跳通信时的能量优化；
- 从周围环境获取能量。

### 4.3.3 蓝牙传感器网络

蓝牙是 ad hoc 网络的一个典型实例。蓝牙是低费用、小范围的无线拓扑，它提供很多通信功能。蓝牙有 10m 的通信范围并且最大吞吐量可达 1.5Mbit/s。蓝牙技术的初衷是为个人局域网产品如耳机提供短距离无线接口。今天蓝牙技术在市场上已很有影响力，为设备提供多种多样的功能。兼容蓝牙技术的设备有脉冲光电血氧计、赌博设备和电脑网络设备如打印机、键盘。

蓝牙技术也在工业元器件系统与网络的无线通信中应用十分广泛，如办公室系统、家庭安全系统、自动化工业、PC 网络、服务元器件和医疗系统、家用设备、手持元器件等。例如，Hand Held Products 公司（http：//www.hand-held.com/）生产的 Dolphin9500 和 9550 系列移动电脑用于数据收集方面的应用。这些设备集成在具备蓝牙、IEEE802.11b、GSM/GPRS 功能的设备中。

网络蓝牙设备相对简单，因为它的规范定义了蓝牙设备如何分类以用于通信。蓝牙设备可以通过互连形成小型或大型蓝牙 ad hoc 网络。小型应用如典型的蓝牙无线个域网（WPAN），它由预定义的 piconet 结构组成。每个 piconet 最多由 8 个蓝牙设备组成。其中一个设备作为控制站，其他的处于从属地位。两个 piconet 可以通过一个称为网关或网桥的通用蓝牙设备连接。两个或更多 piconet 组成的网络称为散射网（scatternet）。散射网内互连的 piconet 构成更大网络如移动区域网的骨干。移动区域网的优势在于它可以使设备之间相互通信（即使两个设备在通信范围之外）。

一个 piconet 是多个蓝牙设备自组织或自发的簇。两个设备需要采用主从结构相互通信时便自发形成 piconet。其中一个设备充当主设备，并规定工作频率、跳频序列、跳频时间和对从设备的测验命令信息。如果区域内有更多的蓝牙设备，则主设备通过给其他每个设备分配工作频率、跳频序列、跳频时间和测验信息等来控制这些设备。

在 piconet 存在的条件下，任何一个蓝牙设备都可以根据具体情况暂时性地充当主设备、从设备或网桥。在 piconet 簇中任一时刻最多有 7 个从设备。如果多于 7 个，那么剩下的设备则不能处于激活状态而被暂时搁置。每个 piconet 最多有 255 个暂时搁置的从设备。每个暂时搁置的从设备都会被直接分配一个暂时搁置的从地址。然而也允许间接寻址，从而使得一个 piconet 内可以有任意个

从设备，即可以超过255个。

每个蓝牙设备都有一个惟一的全局标识用来建立跳变图案。主设备共用全局标识并且与每个从设备有时钟偏移。从设备会重建它所从属的piconet的跳频序列并与主设备保持时钟同步。如果设备充当网桥，那么它将与和自己相连的所有设备通信，并与所从属的每个piconet进行同步。充当网桥的设备在任意时刻只能与一个piconet通信，这是一个潜在的通信瓶颈。网桥可能在所有piconet中是从设备，或者在一个piconet中是主设备而在其他piconet中是从设备。两个或更多piconet通过网桥设备互连，从而形成蓝牙散射网。

蓝牙设备还能承担其他很多任务，如待机、查询、寻呼、连接、保持、搁置和嗅探。待机是指设备电源供电但不加入piconet簇；查询是指设备搜寻可以与之互连形成网络的设备；寻呼是指住设备搜寻其他设备并促使它们加入piconet；连接是指被piconet接受的设备，它们所有必要的通信链路都已建立。从设备在发送数据给主设备时处于发送状态。传输快结束时，它返回到连接状态直到有更多的数据要发送或者被主设备要求响应。嗅探处于低能耗状态，此时从设备按预先确定的时间进入睡眠。保持是指从设备按预先定义的时间保持非激活状态并在这段时间消逝之前不进行通信。停放状态是指从设备没有数据要发送或接收。在停放状态，主设备会让从设备放弃激活的地址，从而使该从设备变为非激活状态。激活的被放弃的地址可以用于其他可能需要停放的设备。

蓝牙散射网是由两个或更多piconet通过网桥连接起来的ad hoc网络。不同的piconet可以通过采用不同的跳频序列在同一区域共存。Ad hoc网络的构造通常相当复杂。于是关于蓝牙散射网的建立有几个模型被提出来。这些模型中最突出的是蓝树、树形散射网生成（TSF）和蓝星。

蓝树协议基于树形网络拓扑的生成，如图4-9所示。有许多不同的蓝树协议。其中一种类型在树的初始化过程中，一个节点被指定为将要生成的树的根。根一旦确定，就会把与其直接相邻的节点作为从节点。每个从节点随之寻呼仍未连接的一跳邻居并尝试将它们设为自己的从节点。这个过程会一直持续下去直到获得附近所有设备并完成树的建立。然后通过为每个主节点设置最多7个从节点的方法使树最优化。

另一种蓝树协议有几个初始树根节点，每个节点按照上述阐述的方式独立工作。一旦建立了几个树，那么每个根生成的树会融合，从而形成一个单一树。

蓝树的生成和维护需要相当大花费。对于由底层到顶层的流信息或者相反方向的流信息，路由和定时花费相当大。蓝树协议有几个变化版本包括基于GPS信息确定位置的蓝树协议。

TSF协议在将每个节点连接到树结构中时会分配主、从角色。TSF由两个或更多的根树组成，这些树不断融合成具有较少树的拓扑结构。这是一个非集中

式和自治愈的过程，期间每个树不断地寻找其他的树和节点。在 TSF 中，一个节点可以在任意时刻加入和脱离树，但任意一个属于两个或更多树的节点可以作为形成更大树的中间节点。节点间的通信通过两种状态来实现，这两种状态是 FORM 和 COMM。在 FORM 状态下，一个设备会检测其他树的节点，以形成更大的树。在 COMM 状态下，设备会主动地传送数据。

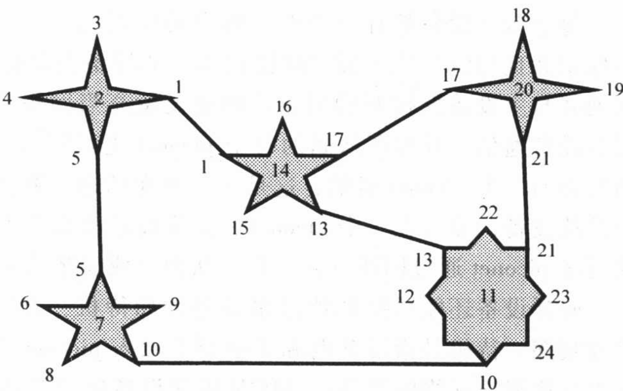


图 4-14　蓝星互连形成的散射网

蓝星协议由三个阶段组成，以形成多跳散射网。第一阶段是通过查询、寻呼和连接进程实现设备发现；第二阶段是 piconet 生成，其中使用权重的概念分配主节点；第三阶段是散射网生成，如图 4-14 所示。在这个阶段，主节点选择网桥节点，以连接其他 piconet。网桥的选择依据与其他主节点相关的节点的权重而定，因此候选节点必须之前已和其他主节点有过通信。蓝星提供分布式解决方案并产生类似于 Mesh 的网络。散射网在节点对之间有多条路由。例如图 4-14 中，节点 4 能够通过若干个 piconet 与节点 24 相连（如节点 1、17 和 21 或者节点 1 和 13）。

### 4.3.4　蓝牙网络的应用

IEEE 1451 智能转换器与蓝牙网络的结合表明在无线传感器与元器件应用中取得了重要进步。成功的结合需要对用于智能转换器和蓝牙协议栈的网络通信模型充分了解。近来 IEEE1451 与蓝牙通信硬件间的接口受到极大关注，目前已有很多关于这方面的文献。

IEEE1451 标准系列基本可以分为两大部分：关于连接转换器与微处理器或元器件系统的硬件接口的定义，以及关于利用现有网络技术连接转换器与不同网络的软件接口的定义。为了将转换器连接到不同网络，IEEE1451.5 的 NCAP 具有很大的处理灵活性并能够将不同范围内的接入点连接到网络，可以通过如下几种不同的无线技术来实现：

- 在无线模块上用最小的 NCAP 有线连接单个智能转换器接口模块（STIM），如图 4-15a 所示。
- 在无线模块上用最小的 NCAP 有线连接少数个 STIM。

• 具有很强处理能力的 NCAP 以集成的方式将很多无线 STIM 连接到网络，如图 4-15b 所示。这使得 NCAP 成为一个接入点。

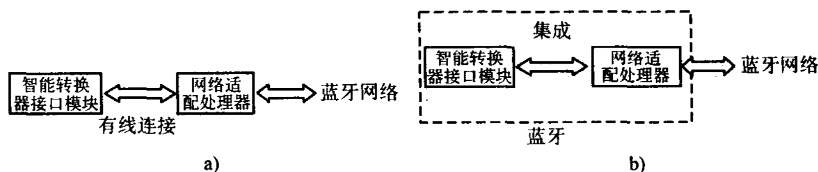



图 4-15　用蓝牙集成 STIM

a）单个智能转换器接口模块连接　b）蓝牙集成单个智能传感器接口模块

CN1000 是 IEEE1451 蓝牙设备的一个实例，它是 Eagle Technologe 公司（http：//www. eagle. co. za/）的产品，拥有 4 个信道的蓝牙无线节点。它从多个传感器收集数据并通过蓝牙无线通信技术将信息传送到网络集线器、计算机或手持设备。每个信道从智能 I/O（SIO）端接收模拟传感信号。CN1000 将从传感器接收到的模拟信号通过 SIO 提供的 IEEE1451 TEDS 转化成工程单元。然后传感器信号由 16 位 A/D 转换器进行数字化处理，然后在每个传感器上和 TEDS 一起传输。这允许每个信道向主系统表明自己。节点既可以使用外部电源，也可以使用电池。

市场上出现了支持蓝牙产品的集成电路。其中一些产品是单个芯片的，其他的则相当复杂。德州元器件公司生产的蓝牙兼容芯片集就是这些产品的典型代表。BSN6030 是基于只读存储器（ROM）的蓝牙基带控制器，它包含完全集成的蓝牙软件栈。TRF6001 蓝牙射频收发器芯片集提供高达 1Mbit/s 的快速数据传输。

另一个芯片集的实例是 STMicroelectronics 公司（http：//www. st. com/）生产的 STLC2150 收发器，它在片上实现具有自动校正功能的压控振荡器（VCO）。该芯片为蓝牙调制输入信号实现了低-中频接收机，从而不需要外部中频滤波器。传输部分是由一个上变频部分和一个完全集成的 GFSK 调制器组成。STLC2150 可以和基带处理器如 STLC2410 或 STLC2415 配对使用。例如，STLC2410 可以处理多达 7 个从设备并通过脉冲编码调制（PCM）接口支持语音信道。此外，它还具有加密和计算能力。它用于 ARM 处理器，支持 64KB 片上 RAM。蓝牙可以提供 128 位数据安全加密。

蓝牙单芯片解决方案使它可用于特殊应用如耳机和行李安全标签。此外，它还能在电话、照相机，便携游戏机中用于与电脑连接。它也受到 IBM、Sony、Compaq、3Com、NEC、Fujitsu 和 TDK 等公司的大量应用。设备级别的蓝牙技术的使用例子有 Sony 的产品。在欧洲和日本，Sony 开发了一种内嵌蓝牙通信功能的迷你型固定镜头的照相机（DSC-FX77）。

许多芯片级产品是以在蓝牙规范下实现元件和系统为目标。产品包括点到

多点的通信元件，这些元件由带闪存的基带控制器、参考振荡器和射频 CMOS 收发器组成。有些情况像射频和噪声环境下会使用两片芯片，以保证更好的性能和可靠性。这种结构基于独立硅最优化，在标准 CMOS 和双极性 CMOS 或射频 CMOS 中的模拟部分采用数字电路，从而可以减少费用和减小规模。

另一个设备级例子是 G&W 元器件公司（http：//www. gw-instruments. de/）生产的蓝牙系列蓝牙串行端口适配器。蓝牙 PCI 适配器连接到电脑或其他设备的 RW-232 串行接口，从而使设备作为蓝牙节点工作，这就使得该设备能够与其他蓝牙设备如电脑、个人数字助理（PDA）、手机等进行通信。蓝牙 PCI 适配器需要软件如 Windows98/ME/NT/2K/XP 和 Linux 支持。

蓝牙技术还需面对竞争。ExtremeTech 报告说 Sony 和 Philips 已同意联合研究"近域通信"，这在短距离 PAN 领域对蓝牙技术构成了竞争。另外，IEEE802 标准也对蓝牙构成了挑战，尤其在长距离通信领域。然而，IEEE802 已将蓝牙协议纳入 WPAN 标准之下。

### 4.3.5　IEEE802 传感器和元器件网络

为了满足无线组网的需要，IEEE 标准协会为局域网和城域网定义了 IEEE802 系列标准。IEEE802. 11 系列标准是用于有线以太网的 IEEE802. 3 标准的无线版本，它们用于扩展传感器与元器件网络。如 3. 5. 1 中和 3. 5. 6 节所述，这些标准用来解决目前所有类型无线通信网络问题。有些网络标准如 IEEE802. 15. 4（由 ZigBee 工业协会支持）用于大型网络，而 IEEE802. 16 世界范围微波存取互操作（WiMax）宽带接入系统是新兴出现的一个关键技术。IEEE802. 20 支持宽带移动数据通信作为第三代移动通信的补充。现在这些标准在市场上有很大发展动力。

IEEE802. 11 标准用来优化吞吐量、漫游以及通信和连接距离。它有 3 个主要子标准：IEEE802. 11b、IEEE802. 11a 和 IEEE802. 11g。IEEE802. 11b 在 2. 4GHz 提供高达 11Mbit/s 传输速率，IEEE802. 11a 和 IEEE802. 11g 速率可达到 54Mbit/s。这些标准在无线传感器和元器件网络中的重要特性是：IEEE802. 11a 仅能工作在 10m 范围内，而 IEEE802. 11b 能达到 100m。

IEEE802. 15. 4 标准为网络定义了低级别的无线接口。这种网络能够在 100m 距离内在高电子噪声和金属干扰区域提供数据传输。除了它的抗噪声功能外，该标准促使了 Mesh 网络的出现，以克服直接视距的瓶颈并在暂时性网络中提供多条可选路径。Mesh 网络也是扩展 ZigBee 网络覆盖范围的一种简单方式，因为距离限制仅仅在较远单元的通信时才会发生。ZigBee 协议为消除 Mesh 网络中经过可选路径的冗余信息提供了必要的机制。

IEEE802. 15. 4 标准已经占据了很大一部分商用无线通信网络市场。应用场

合有建筑管理、工厂自动化、家庭自动化、工厂里的无线传感器网络、汽车工业、自动元器件阅读仪和玩具等。ZigBee的商业实现则基本没有。Chipcom公司宣称它的硅设备支持ZigBee，摩托罗拉公司也公布了它的IEEE802.15.4解决方案。上述两种方案都工作在2.4GHz ISM频带上。摩托罗拉公司将它的M68HC08微控制器和射频包无线芯片结合使用。IEEE802.15.4和ZigBee协议栈由软件实现。其他一些公司如英特尔、摩托罗拉、Atmel和飞利浦也在研发类似的产品。

IEEE802.16 WiMax标准用于宽带无线接入，它能达到50km或更大的通信距离，传输速率高达70Mbit/s。Wi-Fi系列（IEEE802.11a、b、g）用于无线短距离以太网的应用。蓝牙作为IEEE802.15WPAN标准的子集，有10m通信范围并可以通过增加功率使范围进一步延伸，它的传输速率约为1Mbit/s。

IEEE802.15.4标准定义了星型、树型及Mesh网络拓扑结构。该标准主要考虑OSI参考模型中的两层：无线通信（物理层）和协议（数据链路层），两者都用于星型（点到点）和对等拓扑中。ZigBee应用于工业自动化、家庭控制系统和建筑自动化中。

IEEE802标准在芯片级别上有很多应用，如Chipcon公司（http://www.chipcon.com/）生产的CC2420射频收发器。该收发器由NEC公司（http://www.nec.com/）生产的低功率8位闪存微控制器支持。这个模块与IEEE802.15.4和ZigBee无线通信网络标准兼容，并在工业、商业和居民生活方面得到大规模应用。CC2420工作在2.4GHz，允许物理层和MAC层的通信，这与现有的IEEE802.15.4规范相一致。NEC微控制器支持通过与PC连接的USB接口的flash编程和调试。

另一个芯片级应用是JS24Z121，它是Jennic公司（http://www.jennic.com/）IEEE802.15.4和ZigBee的单芯片产品。该芯片为嵌入式微控制器功能的应用提供了单芯片的解决方案。它与现有的IEEE802.15.4规范相一致并能够实现基于高级加密标准（AES）数据流的扩频通信。它也支持基于ZigBee或网络层的应用。该芯片集成了无线功能以及模拟（A/D转换器、D/A转换器、比较器、温度传感器）和数字设备（SPI端口、UART、定时器、通用I/O）。该产品的功率消耗低，特别是在睡眠模式下。该产品已有配套的IEEE802.15.4软件和可用的ZigBee协议栈。

在设备级别上，Moteiv公司（http://www.moteiv.com/）生产的Tmote Sky是IEEE802.15.4的产品，可应用于Mesh网络。它用于无线传感器网络，具有低功耗、高数据传输速率。Tmote包括有很多集成外围设备，如12位A/D转换器、D/A转换器、定时器、$I^2C$、SPI、UART总线和直接存储访问（DMA）控制器。它还包括用于编程、调试和数据收集的USB协议。

NC220W/NC200无线/有线通信网络照相服务器是另一种设备级产品，它由

Hawking Technology 公司（http://www.hawkingtech.com/）生产。它允许从 Web 浏览器或 Windows 工具的远程接入来浏览图片。它在 802.11b WLAN 内具有 11Mbit/s 的图片传输速率。

期待有更多的 IEEE802 系列的产品。

## 4.4 无线集成网络传感器

无线集成网络传感器（WINS）为嵌入式传感器、控制器和处理器提供分布式网络和 Internet 接入。WINS 从 1993 年开始由加利佛尼亚大学和洛杉矶大学进行研发。3 年后推出了第一代 WINS 设备和软件。接着由国防高级研究项目署（DARPA）资助的低功率无线集成微传感器（LWIM）工程验证了多跳、自组织无线通信网络的灵活性。同时，该第一代网络也验证了微功率级无线传感器节点和网络运行算法的灵活性。

目前，WINS 的基本网络结构和辅助电子元器件与无线传感器网络并无太大区别，这在 4.3 节已有所说明。因此，在这里就不再详述 WINS 元件配置和网络拓扑了。下面就 WINS 的特性和环境问题做具体阐述。

与无线传感器网络和无线移动传感器系统相比，WINS 属于相对较旧的技术。WINS 的初衷是在大规模应用如运输、生产、医疗、环境监视、安全系统、边界控制、城市交通控制中用于简化监视和控制。WINS 的目标是联合传感器技术、信号处理技术、判决、计算和无线通信网络等技术用于低功率系统中。WINS 的主要特点是射频通信能力，它通常为低速率短距离的通信提供双工模式。

大多数 WINS 的目标是将传感技术与低功耗传感器接口、信号处理技术、数据转换、计算、控制功能、射频通信电路等结合起来。低费用和低功耗的要求使得这些系统的设计面临严峻挑战，尤其在用传统 CMOS 电路来设计系统模块时显得更为突出。在某些应用中，传感器需要持续工作来进行事件识别，而这些元件的网络接口有较低的占空比。这使得设计和应用更具挑战性。

在一些基于 WINS 结构的系统中，传感器需要持续检测事件。所有的元件、传感器、数据转换器、缓存等都工作在微功耗级。完成事件检测后，微控制器会向信号处理器发布命令。然后，节点工作协议决定是否向远程用户或邻居 WINS 节点报警。最后，WINS 节点提供确认事件的属性，比如所有网络节点存储的查询表中的事件地址。

WINS 必须能够在本地区域通过短距离和低比特速率通信设备支持大量的传感器。因此，网络设计必须强调恢复信息的产生并考虑密集传感器分布服务。于是，网络结构采取分离节点，以进行多跳通信。

WINS 的多跳通信（见图 4-16）具有大功耗和可升级特点。在这种特定情况下，数据信息通过非对称链路传送给终端或通过网桥传送给传统有线/无线 IP 网络服务器。然而，射频通信的路径损耗是影响网络通信的一个限制，接收功率 $P_R$ 随传输距离 $R$ 的损耗关系为

$$P_R \propto R^{-\alpha} \tag{4-1}$$

在 WINS 密集区域，多跳结构允许节点间进行链路通信，提供增强的窄带通信能力，并可以在密集节点布局时减少功率。

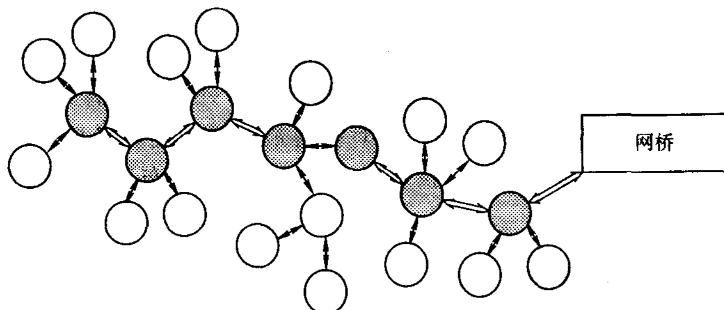



图 4-16　WINS 的多跳通信

近来应用于 WINS 的嵌入式无线通信和网络协议是一个快速发展的领域并掀起了广泛的研究热潮。嵌入式无线通信网络包括扩频通信、信号编码和多址接入，如 FDMA、TDMA 和 CDMA 网络协议。嵌入式无线通信通常工作在免许可的频段（902～928MHz）上，频点为 2.4GHz。高频工作时功耗会增大以及智能天线在频率下降时会使天线增益降低，而使用这些频段可以取得折中。目前关于 WINS 已有成型的自组织、多跳 FDMA 和 TDMA 网络协议的模型。

智能传感器和信号处理技术的便利将进一步促进 WINS 更大规模的应用。这要取决于可升级和低费用的传感器网络结构和高效的射频通信技术的发展情况。传感器信号需要通过低功率收发器传递给用户。例如，环境监视应用中，必须持续进行信号处理，以保证对事件的持续监视。这就有必要尽可能采取低费用和可升级的技术对分布测量数据进行局部信号处理。分布信号处理和判决使得远程传感器能够识别事件。局部获得的信息以短信息包的形式表示并传递给主站，以作全局判决。

WINS 节点的主要制约因素是费用和功率要求，因为大多数传感器是电池供电的。这样低功率传感器接口和信号处理电路结构可以保证更长的持续工作时间。然而，无线通信能量要求又是另一个限制。传统的无线通信网络由复杂的协议来支持，这些协议本是用于便携移动终端的语音数据传输的。这些网络同样支持长距离通信，比特速率可以达到 100kbit/s 以上。

无线集成网络传感器在采用 CMOS 微功率元件如低功率 A/D 转换器的情况

下可以工作更长时间。以 A/D 转换器为例，通过采用低功率 A/D 转换器可以使得全工作状态下电流较低（30μA 或更低），从而减小工作功率。在这种情况下，典型微传感器的采样速率可能会受到限制（如 1kHz）。还有一点很重要，在有些应用中信号频率可能很低，在热红外传感器中接近直流电，因此 A/D 转换器必须保持高度稳定性和较低的成本。为了达到这个目的，delta-sigma 转换器可能比较适用。一阶 CMOS 差动积分转换器对 100Hz 信号有 9bit 的解析率，有电压为 3V、电流为 30μA 的功率消耗。

在很多应用中噪声都会产生问题。作为低功率系统，WINS 需要在环境噪声干扰的情况下检测信号源。所有源信号都会随着距离的增大而发生幅度衰减。为了最大化检测范围，必须优化传感器灵敏度。另外，由于背景噪声的限制，对于任何传感器都有最大检测范围。这对获得最大灵敏度和发展可能大规模分布的微型传感器至关重要。MEMS 技术为实现这些高度分布系统提供了一个理想途径。

### 4.4.1 WINS 功率需求

无线集成网络传感器要求低费用、低功率、短距离和低比特射频通信速率来支持整个系统。目前的技术中，许多射频调制解调器已被作为微型设备中的嵌入无线接口，但这并没有明显影响费用、样式和功率。4.3 节已对这些类型的无线传感器进行了讨论。

传感器节点的功率通常由微型电池单元供应。现在平均系统需求必须很低（30μA），以提供长时间的工作寿命，它由一个典型的微型硬币型锂电池单元提供。这些单元的峰值电流不超过 1mA。平均和峰值电流需求对电路设计构成了挑战。低功率、可靠的和高效的网络节点包含传感器信号处理、控制以及无线通信网络接口。一个分布式网络传感器设备能够持续地监视不同的传感器系统、处理传感器信号，当根据所测量信号做决定时，能够跟随环境和用户需求的变化做出相应的改变。为了降低功耗，网络协议必须使高功率射频通信系统的占空比最小。

传统的 WINS 射频系统设计基于集成芯片和板级元件的组合，这种元件的接口能驱动 50Ω 电阻性负载，以用来匹配片外传输线路和元件。但是，通过将有源元件与无源元件整合到一起，阻抗值可能会增大，降低了功率消散。各构成系统内部或者构成系统之间的阻抗由每个节点引进的高 $Q$ 值感应器控制，这个感应器用来平衡寄生电容，否则会产生功率消散。高 $Q$ 值感应器的引入使窄带、高输出阻抗、弱转化的金属氧化物半导体（MOS）电路能够从低频段转换到相应频带宽度的高频段。

在射频设计上，传统 CMOS VCO 电路在微功率水平上性能会下降。但是，

对于存在 LC 谐振器的 VCO 系统，全线路质量因子为 $Q$，相位噪声功率则为 $Q^2$。相位噪声的这个优势中和了由功率减小带来的性能下降。除此之外，高 $Q$ 值谐振器不仅通过振荡器反馈回路提供电压增益，还允许较小的晶体管跨导。同时，可以减小维持振荡器所需的功率。

在嵌入式无线通信系统中引入高 $Q$ 值谐振器可以实现功率降低这一优势。但是，这种窄带操作也需要被动元件值的精确和调谐。可调谐元件基于在 CMOS 加工过程中植入的变容二极管。

实现嵌入式无线通信系统所需要的感应器可以配置在片内元件或被动片外元件上。在片内 LC 电路上，由于衬底损耗和传导损耗，这些传感器的 $Q$ 值在 1GHz 时限制在 3～5 之间。这些电路配置能够很好地适应宽带高速无线通信系统。但是，嵌入式无线通信系统一般要求窄带操作，所以必须寻求高 $Q$ 值元件。设计片内高 $Q$ 值传感器网络的方法有很多。例如，低温多层共烧（LTCC）技术实现了灵活的器件配置，整合了一个反转芯片，这个反转芯片安装在嵌入了电容器和无源电感器的衬底上。这种设计方法可以包含一级和二极耦合线圈，耦合线圈提供了 50Ω 的测量接口。

LTCC 衬底提供了低损耗的无源组件，且支持集成感知、信号处理与微处理器设备的包。在 1GHz 上，使用 CMOS 技术构造的集成传感器占据了物理线路芯片的区域，但是使用 LTCC 衬底技术构造的传感器却不需要。

WINS 嵌入式无线技术发展的实现依靠 CMOS 电路技术，和附加的无线组成元件一起可实现低代价的制作。CMOS 技术中射频系统的发展伴随着许多挑战。对于嵌入式无线技术非常重要的问题是低的晶体管跨导和无源射频组件的限制。此外，WINS 嵌入式无线技术设计必须能够解决典型电池源的峰值电流限制，典型值为 1mA。这就需要射频电路配置实现比传统系统低 1～2 个数量级的峰值功率。范围小和比特率低的特征使输入噪声的要求可以降低。此外，与传统射频调制相比，嵌入式无线通信系统的信道间隔可以增大，从而进一步降低对选择性的要求。对操作要求的限制必须考虑不要与占用同样免许可频段的传统扩频技术相互干扰。

传统射频调制中，收发机功率耗散主要是发射功率。在低发射功率（小于 1～3mW）的限制下，WINS 接收机系统功率耗散等于或大于发射机的功率耗散。这是由以下方面直接引起的：接收机复杂度的提高、第一级放大器功率耗散的要求以及 VCO 耗散的功率。所以，提出微功率 CMOS 有源器件的设计方法是十分关键的。这些电路必须以一个低的跨导工作在 MOS 次门限区域下。

### 4.4.2 WINS 的应用

无线集成传感器致力于大规模的应用，紧凑的几何分布和较低的成本使无

线集成传感器在市内的的配置与分布的花费非常低，只占传统有线传感器及元器件系统的一小部分。无线集成传感器的应用还包括：

- 监测陆、海、空资源。
- 监测、控制运输系统与国界线，实现国家范围内的有效性、安全性。
- 告知战场形势以提供人员调动，在本地或广域规模下实现健康监测以增强安全性与有效性。
- 控制大都市区域内的交通和为安全、紧急、灾难恢复提供服务。
- 为组织和企业提供制造信息成本和质量控制的服务。
- 在生物医学应用中提供感知、监测和控制功能，帮助患者联系到门诊、流动门诊和医学职业人员。
- 维持发电站、工厂、电器、车辆和能源系统中条件性使用的设备和器件，用来增强可靠性，提高服务质量，降低能源耗费。

传统传感器和微功率传感器的接口对 WINS 节点有一个重要的要求。对于许多应用（例如军事），WINS 系统需要在一个低功率、低抽样频率和受限的背景环境感知度的条件下运行。微功率接口电路在直流电或很低的频率下抽样，此时这些 CMOS 接口中的“$1/f$”噪声很大。微功率信号处理系统可以配置在低功率下，而且字长受限。通过一个无线网桥连接到传统有线通信网络服务设施，WINS 网络可支持多跳通信。

最近，WINS 网络完全的模型已经在防御、工厂自动控制和条件驱动的维护应用中得到了演示。这些结果显示新应用的广泛实现需要集成、低成本和简单的 WINS 技术。在一个芯片上实现微功率 WINS 系统的技术创造了一个新的、嵌入的和紧密分布的计算与感知平台。

## 4.5 即插即用传感器和网络

传感器的通信被限制在感知元件和数据获取电子元器件间的有线连接上，或者私人无线通信协议上。现今无线通信已经得到普遍的应用，采用适当的协议例如蓝牙，一些系统可以通过无线连接到传感器节点进而连接到因特网上。实现无线通信网络的一个方法是采用即插即用设备。

即插即用（PnP）是计算机领域的一个术语，描述了计算机添加新设备，一般是外围设备，而不需要重启计算机的功能。有许多描述类似功能的术语，如即插即用和带电插拔。即插即用这个术语更多地让人想起了微软公司，微软公司在 Windows95 的一系列产品中开始使用这个术语。即插即用使用户在计算机上更换组件和设置而不必知道这些设置的太多细节，因为计算机可识别设备的最佳配置并据此调整这些设置。

市场上有很多类型的即插即用传感器和设备，并能够应用到很广泛的领域内，例如：

- 需要快速、简洁配置的应用，对速度有要求——新产品的测试和开发。
- 需要频繁配置的临时性应用——测试新产品。
- 不可能使用线路的应用——健康监测和其他动态的系统。
- 在恶劣环境中的应用——应用在过热、过冷、高湿度、腐蚀性和放射性的环境中。
- 使用电缆造价很高的应用中——远程操作。
- 移动应用——军事应用。

无线传感器网络中两个重要的因素是网络配置和网络管理。在无线通信网络中，如果使用集中式控制器，则这个控制器必须知道：哪些时刻连接着哪些传感器；哪些传感器在通信链路的范围内；网络中是否有新传感器添加或删除。如果在移动传感器的情况下，网络配置改变得很频繁，那么跟踪网络配置将是很难的。即插即用传感器解决了上述中的一些问题，它通过定义一种有着标准物理接口的的网络架构，来允许许多不同类型传感器接入到同一网络中，且定义一种自识别协议，使网络节点可以动态地根据网络变化进行描述和配置。

即插即用传感器的自识别和自连接特征是通过使用 SIO 来达到的。SIO 将不同传感器输出转变为标准的高层模拟电压信号，提供给网络节点进行通信。包含 SIO 的节点将模拟信号转变为适当的数字信号，通过无线链路向主计算机传输。由于提供了这种标准化的输出和描述传感器与相关联信号质量的信息，网络节点与主计算机间的通信可以通过用户选择的方式进行。这个过程在很大程度上提高了连接度，简化了信息管理过程。

有两个因素促进了即插即用传感器的广泛采用：IEEE P1451.4 智能传感器接口和因特网。IEEE P1451.4 是使用标准化 TEDS 的具有自描述性能的模拟传感器的标准，在 3.5.8 节中有详细解释。通过所谓的虚拟 TEDS 的分布，因特网将即插即用概念引入到遗留传感器和系统中。新一代的测量和自动控制系统引入这些概念，使自己的网络变得健壮、简洁与更加智能化。

即插即用传感器的典型例子是由 Crossbow Technology 公司（http://www.xbow.com/）提供的 MTS400/420 系列多功能板。这些板包含了能够测量温度、湿度、气压、光、加速度等的传感器。MTS400/420 系列环境监测板能连接处理器/无线板，因而它可以用来构建监测环境的无线传感器网络。这些板工作在 2.4GHz，与 IEEE/ZigBee 标准相兼容。MTS400CA/420CA 的应用范围可以从一个简单的无线气象站扩展到有着环境监测节点的全 Mesh 网络。

**蓝牙和即插即用传感器网络**

蓝牙提供短距离本地无线通信，因其造价低廉，工作在免授权的 2.4GHz 频

段，因而形成了一个广泛适用的世界性标准。蓝牙技术已被广泛应用于笔记本、掌上电脑、移动电话、个人计算机和其他多种设施中。

许多厂商都提供适合于消费者和公司应用的蓝牙产品。大多数基于蓝牙的系统架构集成了硬件和软件资源，使无线传感器可以用于消费者产品和工业中。由于蓝牙无线技术的杠杆作用，数十或数百个传感器可以以一种特殊的应用配置在网络中。如图 4-17 所示，基于蓝牙的网络可以连接不同厂家和型号的传感器与数据获取系统，例如因特网环境下的掌上设备、笔记本电脑和台式电脑。

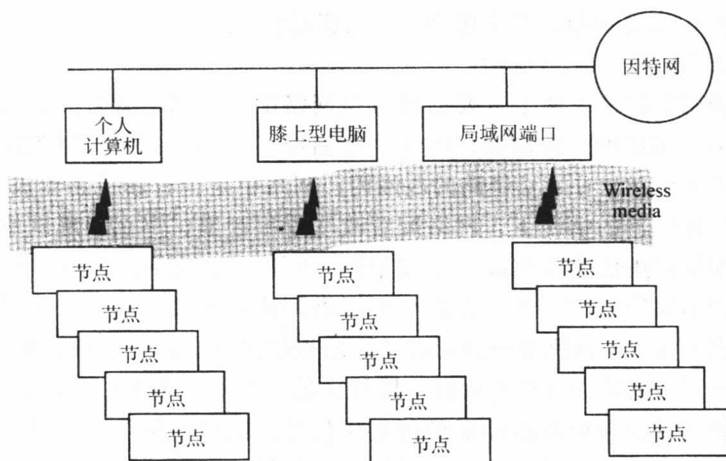



图 4-17 经由因特网连接的无线传感器网络

因为蓝牙是一个全球性标准，使用全球范围内免许可的 2.4GHz 射频频段，所以安装蓝牙的设备可以在全球任何地方在同一个频段内工作。例如，安装蓝牙的 PDA 可以与任何安装蓝牙适配卡的个人电脑相连接，不论这台电脑的厂商是谁。

蓝牙特别兴趣小组（SIG）正在推动蓝牙技术的发展和应用。蓝牙 SIG 包括如 3Com、爱立信、IBM、因特尔、朗讯、微软、摩托罗拉、诺基亚和东芝（2000 多家公司）等推广商。据推测，现在全球范围内使用的蓝牙设备超过 7 亿台。

在典型的即插即用应用中，用户将传感器安装到机器或设施（如建筑）的一些特定监测点上。然后这些单独的传感器被连接到一个无线节点上。一块应用区域中可以安装任意个节点，每个节点最多控制 4 个节点。为了与计算机或掌上设备进行无线通信，节点上还包含蓝牙设备。节点收集多个传感器上的数据并通过蓝牙无线通信技术将这些数据传输到一个网络集线器或其他以太网设备例如计算机上。节点可以兼容模拟或数字信号。

已有许多应用于个人电脑和掌上电脑的基于蓝牙的无线即插即用设备，例

如无线串行 RS-232 接口、USB、PCM-CIA/PC 卡、传真机和调制解调器。无线串行 RS-232 接口被广泛应用于工业、医学和自动控制行业中，为传感器、测量器械、机器人技术、调制解调器和扫描仪提供接口。基于蓝牙的即插即用系统的一个典型例子是 TADLYS 公司（http://www.tadlys.com/）提供的 Garnet M。这个系统用来收集医院和门诊的医疗器械信息。

## 4.6　工业无线通信网络和自动控制

工业无线通信网络中的网络拓扑结构和支撑电子元件与4.3节和4.4节所述的无线传感器网络和 WINS 相类似。所以，本节将不会重复元件和网络拓扑结构的细节。但是，工业无线传感器网络正处于一个不断变化的状态中，它随公司和生产商现有的配置而改变。许多工业操作包含总线，无线传感器需要被整合到现有的元器件网络中。本节将会讨论无线通信系统对现有工业基础设施及独立于无线网络的设施需要作出哪些改变，并且会给出一些实例。

### 4.6.1　无线现场总线

许多现场总线生产商意识到无线技术的潜在利益，因此在他们的网络中大力引入无线通信系统。在许多应用场合，无线产品都提供了解决方案，例如当控制设施的配置需要从一个移动物体中获取信息，或在有线网络中进行变动时操作困难且造价昂贵。

DSSS 和 FHSS 是工业自动控制中通用的无线技术。频谱扩展降低了电子噪声和人为干扰的影响，它与接收机的匹配使信息能顺利通过。它产生的伪噪声频谱降低了信号之间相互干扰的可能性。这一点使人们考虑到许多新的未经许可的无线通信网络可能会与现有的许可的无线通信网络相干扰，或者甚至频谱相重叠。DSSS 和 FHSS 保证了冲突无线环境中的可靠通信。它们能够对抗多径通信，对传播路径上的物理实体可能带来的干扰有很好的抑制作用。

对于无线现场总线，本书已给出了必要的现场总线（见1.6节）和无线通信系统（见第2～4章）中的背景信息。惟一要补充的一点是工业无线元件和系统在工业应用中应该更加可靠、稳定。这里将会给出一些典型的例子。

无线工业现场总线对一系列产品都是可用的，Industrial Networking Solutions 公司（http://www.industrialnetworking.com/）给出了一些例子。这个公司的产品包括无线/IP 以太网和无线总线网关。例如，SEM2411 是一个高速无线以太网桥，在2.5km 通信范围内可以传输1.23Mbit/s 数据。使用 FHSS 技术工作在2.4GHz 频段可以获得高达1Mbit/s 吞吐率。这种网桥的设计大多应用于连接以太网兼容的设备，例如传感器、PLC 和计算机等。同样地，BAT 11B 无线以太

网桥使用 2.4GHz DSSS，与 IEEE802.11b 相兼容。905U-G 无线网关为处理和自动控制应用中的各种总线之间提供接口。它支持例如 Profibus、以太网、Modbus、DF1、DeviceNet 和 Modbus Plus 等协议。905U-G 包含了一个集成 900MHz 免授权频段的无线收发机，以一种安全可靠的无线协议传送传感器和控制信号(I/O)。905U-G 具有的其他特点包括高安全性数据加密，自动应答和纠错，点到点寻址和多路径路由。

在许多其他公司中，Grid Connect 公司（http://www.industrialethernet.com/）有许多工业无线通信网络硬件和软件，这些都适合于蓝牙、以太网、IEEE802.11b、串行和 USB 产品的短距离和长距离操作。

### 4.6.2　工业无线 Mesh 网络

Mesh 网络大多数是基于蜂窝电话形式的无线链路，使用点到点或点到多点传输。但是，研究表明传统无线通信网络对工业应用存在不利条件，包括严格的构造、过度重视计划编制和通信过程中通信质量的下降。与蜂窝电话形式的 Mesh 构造相比，无线 ad hoc Mesh 网络被证明是有效的。ad hoc 网络的优点之一是，它是多跳系统。在多跳系统里，一个节点可以与相邻的一些节点通信，因而在传输包时节点之间可以相互帮助。这对一些运行条件中射频传输很困难的情况是很重要的，比如存在重机械和高压电力的工业运行环境。

一个 ad hoc 多跳网络是无线 Mesh 网络的一个例子。这个系统最初运用在工业监测和控制应用中。它通过点到点或对等联网模式通信。在 ad hoc 网络里，Mesh 节点可以发送和接收信息，并且可以充当路由来向相邻节点中继信息。在中继过程中，一个无线数据包可以经过许多节点到达它的目的节点，如图 4-18 所示。ad hoc 网络中的信息中继过程形成了可靠的通信链路，可运用在多种应用中。而且，ad hoc 网络运作需要很少的准备和计划编制，它是一个可靠、灵活的网络，能够扩展到成百上千的设备上。

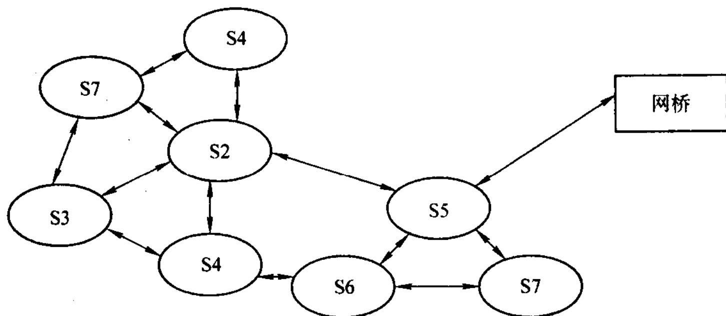



图 4-18　一个无线 Mesh 网络

总之，Mesh 拓扑结构增强了网络的整体可靠性，这对大多数的工业环境是

很重要的。与因特网和其他基于路由的点对点网络类似，一个 Mesh 网络提供多条冗余通信路径。如果一条路径因各种原因而断开，那么网络会自动将信息路由到一个备用路径上。Mesh 网络的另一个优点是，与有线相比，它可以实现短期内的配置。网络不需要精密的策划和现场实现就可以达到可靠的通信。

Mesh 网络的一个应用是分布式工业控制系统。近些年来已经花费了很大的精力来研究怎样在控制系统中添加更多的智能性。IEEE1451 标准就是一个证明。控制点分布在网络中，使智能节点与网络中的其他节点直接通信，而不需要再经过中央控制点。

无线 Mesh 通信的分布式控制设备为传感器和变换器簇间的交互提供了全新的空间。传感器可以直接与网络中的其他设备通信。这使校准和故障检修与模块化系统相比更加简洁。模块化系统能够实现本地决议制定。

点对点链路，也可以称作无线网桥，取代了一条单一的通信电缆。它可以应用在多种场合，例如连接 PLC 到远程监测站。如果两个端点离得足够近，可以排除射频干扰和路径损耗的影响，那么点对点链路就能够可靠通信。一个可靠的通信能够通过重新配置无线资源或提高发射功率达到。

无线通信系统的点对多点链路是指由一个基站或接入点控制网络内的所有其他的节点，也即集线器或星型拓扑。在这种布局下，点对多点网络汇聚到一个单一的接入点。此时，网络的可靠性依赖于中央接入点到其他端点的射频链路质量。

工业环境下，很难找到一个可以设置接入点的场合，使其能提供到各个端点的可靠通信。移动接入点使其到某个端点的链路质量提高可能会导致它到其余端点的链路质量下降。无线 Mesh 网络不需要一个系统管理器去控制它。信息到目的地的传输是自动完成的，多个节点通过中继协作将信息传送到目的节点。Mesh 网络是自组织的，不需要人为手动配置，因此配置新节点或重新配置已有节点是自动完成的。

可靠性和适应性是适用于工业控制和监测的网络中最重要的特征。点对点网络可以提供可靠性，因为网络中的设备不需要操作一个以上的端点，所以网络算法可以依据可靠性和适应性来制定。另一方面，虽然点对多点网络可以处理更多的端点，但它的可靠性会下降，因为各节点的任务需要明确且接入点同时接收到不同节点的信息。并且，接入点和端点的摆放位置也会影响可靠性和适应性。

如果环境因素使可靠性下降，那么很难或者不可能在增加可靠性的同时提升点对多点的适应性。与此相比，Mesh 网络有着与生俱来的可靠性，可方便地根据环境或建筑的限制做出改变。也可以通过增大它的规模，使之同时可处理多个端点。

Mesh网络运作的一个重要目标是适应性，它仿效因特网的运作规则，例如在后者中，如果一个路由器出现故障，那么信息可以通过别的路由器从而经过另一条路径得到传输。同样地，如果Mesh网络中的一个节点或一条链路出现故障，则信息可以通过别的节点传送。因此，一个或多个节点的故障不一定能够影响到网络的运行。因为对信息重新选择路由不需要人为的干预，所以Mesh网络是自愈合的。如果信号过弱或存在盲区，则只要在适当位置设置一个转发器节点就可解决。

冗余是一个程度问题，必须被详细说明。在Mesh网络中，冗余度实质上是节点密度的函数。通过增加额外的节点，一个网络可以有意地向高可靠性方向设计，这样每个节点都可以有两条或多条收发数据的通路。

Mesh网络是可以升级的，能够处理成百上千个节点。因为网络的操作不依赖于一个单一的中央控制点，所以添加若干数据收集点或网关是可能的。缩短节点间的距离会提高链路质量。如果距离缩短一半，那么接收机端的信号强度就会至少增大4倍，这使链路不用增强每个节点的发射功率也可以提高可靠性。可靠性、冗余度和工作范围都可以通过向网络中添加节点来得到改善。

工业系统从这一无线传输格式得到好处，它满足了若干相互冲突的要求：冗余度、分布式通信、灵活性和可靠性。另外，自组织和自愈合网络在配置和维护上代价更低，尤其是无线电通信设备和微处理器更加便宜。

无线多跳Mesh网络的一个应用是设备的诊断监测。在不影响传感器常规运作的条件下，网络可以监测操作和传感器信号的异常情况。如果一个异常信号或趋势出现，就会促发警报，这个警报与正常的操作是不相关的。

无线工业Mesh网络的例子由Expert Monitoring公司(http：//www.expert-mon.com/)提供。这家公司开发了许多工业环境下无线通信网络所用的硬件和软件。覆盖范围为一个工厂或场所的网络，可以容纳任意数量的发射机模块。无线通信网络控制单元可以是一台电脑，可通过使用蓝牙技术向它发送和收集传感器数据。这种无线通信网络使用WiSView软件。

另一个无线Mesh网络的应用是针对特定场合的研究，由Ember公司(http：//www.ember.com/)提供，为了在严峻的工业环境下使用无线Mesh网络。这家公司的研究者在一家水处理厂设计和实现了一个无线控制系统。这个工厂环境对无线传输非常不利，包括加厚加强的混凝土墙壁、大的金属物件、重机械、高压电缆等。这种情形下的设计目标是连接管型走廊里的器械到远端控制室内的控制面板上。为了实现它，需要在一台计算机的串口上安装上一块无线网卡。每个处理元器件的总线连接也被替换成了无线网卡。共有12个元器件上安装了无线网卡。无线元器件的安装位置包括射频信号需要穿过混凝土墙的地点。经过一些实验和挫折，说明通过在合适地点添加一些中继和转发点，

射频链路质量将得到很大的提高。研究报告指出，系统运行非常成功，且无线传输网络与有线串行电缆网络之间并没有很大区别。

## 4.7　小结

在本章中，有许多地方需结合第 1 ~ 3 章所学内容进行理解。本章表明现代无线传感器和元器件网络可以通过使用嵌入式或模块化设计完成。网络可以用网桥、路由器和中继器扩展。本章讨论了无线传感器和元器件的构造，并举出了许多实例。还讨论了无线通信网络的功率问题。无线传感器网络和 WINS 这两个例子也被进行了详细讨论。蓝牙和 IEEE802 技术的应用也得到了扩展。文中还指出无线通信网络可以通过点对点或点对多点的通信方法来配置。

# 第5章　无线传感器和设备的应用

前几章主要讲解无线传感器、设备的建造和运行所必要的信息。讨论了组网中的重要问题，给出了无线传感器和设备的一些例子。通信行业和集成电路近期的发展以及无线标准的出台促使了无线传感器和设备的大规模生产。现在无线传感器和设备可以应用在工业场所、消费品、科学实验室、测试设施、军事、航天、家庭建筑、医院、网络等中。这些应用场合在持续不断地增多，因为无线传感器和设备制造商应消费者要求提供了越来越宽泛的无线设施。本章给出了无线传感器、设备和网络在下述领域中的一些例子：

- 特殊应用场合的无线传感器和设备；
- 商用无线单机传感器和设备；
- 无线通信网络的研发（R&D）；
- 工业应用；
- 人体健康与环境中的应用；
- 射频识别；
- 消费品生产和其他应用。

这里所列内容并不是很全面，因为无线通信设备差不多每天都可以找得到更多更创新的应用。

## 5.1　特定应用场合的无线传感器和设备

无线通信设备已经存在了很长时间，但是它们很昂贵且主要为特殊应用量身订做。此外，无线通信网络主要应用在遥感勘测和数据采集与监视控制系统中，特别是远程区域的数据传输。现在，无线通信设备和网络同时应用在大范围领域和本地环境中，可能会替换工厂、家庭建筑、实验室、自动化和测试等中的有线连接。从这方面看出，无线传感器、设备和网络是相对比较新的，但是它的出现对于有线系统来说造价更低廉，更有竞争力。

虽然无线通信设备和网络已越来越普遍，但还是不能满足许多特定场合的需求。这可能是因为制造商只是没有提供这种产品而已。许多情况下，必须从无线设施的基本原理和构成出发去设计它。本书提供的信息可以帮助完成设计无线通信设备和网络的目标。本节进一步提供了一些指导。

在设计、建造和配置过程中，应用于特定场合的无线通信设备与网络设计

者必须考虑到一系列问题。无线通信设备的元件一般包括集成电路（IC）或板的组装、电路板、面板或主板的组装、模块组装或插槽系统、框架安装设备、DIN 导轨和网络单独系统。元件可用的一般信号输入包括直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、频率和可充电设备。传感器的输入包括加速计、热电偶、电热调理器、电阻温度检测器（RTD）、应变计或电桥等。此外，可能会需要特殊的输入，包括编译码器、计数器、转速计、定时器、中继或转发器。许多产品有集成传感器或集成电路板形式的传感器。设备的输出一般包括电压、电流、频率、定时或计数器、中继信号、电阻和电位计。

必要的设备界面有无显示、面板显示、触摸屏、手持或远端程序设计器和可编程计算机。主要连接的选择包括直接的底板接口、RE-232、RS-422、ST485、USB、IEEE1394、通用接口总线（GPIB）、小型计算机系统接口（SCSI）、晶体管-晶体管逻辑（TTL）、并行口、以太网、调制解调器、无线或遥感设备。同时，也要重点考虑到传输数据速率。设备一般应用在综合实验室、工厂、环境监测、交通工具、航海、航空或军事、地震预测或地球技术勘查、气候或气象学、医学或生物医学中。设备需考虑到的额外规范包括应用软件、记忆和存储、网络规范、A/D 转换、滤波器规格、放大器规格和环境参数。

在设计特殊应用场合的无线通信设备时，需重点考虑的因素包括：

- 集成度：单芯片解决方案、多芯片模块或超致密印制电路板。
- 供电模式：环境供电、电池、电力设备或其他电源设施。
- 采纳的通信标准：蓝牙，IEEE802.11，其他免许可和 ISM 频段或其他标准。
- 网络标准和拓扑。
- 安全问题。
- 测试元器件系统和组网的融合。
- 管理问题和方案。
- 使其他组织参与进来，例如无线电通信设备设计者。

无线传感器与设备的设计在第 4 章进行了讨论。设计和建造特定场合应用的无线通信设备和网络时，可以利用以下的方法：

- 含有无线传感器的无线传感器系统。
- 将无线特征包含在传感器或元器件中的嵌入式元器件系统。
- 组合或附加系统，通过其他组织提供的外部或即插即用无线通信设备将有线传感器网络转换成无缝无线连接。

### 5.1.1 特定应用场合的无线传感器和网络

传感器网络涵盖了分布式感知、运算、存储和无线多跳通信。无线传感器

网络应用在许多科学、军事和医学领域中。最近几年所取得的进步使得网络可以配置不太昂贵的传感器节点，传感器网络众多的潜力在许多科学和商务应用上得到了体现。

生产无线传感器时，需要微型发射机、接收机、混合收发机以及原始设备生产商（OEM）的无线数据板。相应的协议固件和软件支持了无线传感器在网络环境下的操作。无线传感器被配置应用在许多场合下的短距无线数据传输与控制链路中，比如无线读条码器、商标印刷机、信用卡阅读器、收据印刷机、自动实用量表阅读系统、运动和娱乐器械、工业遥感勘测、RFID 标签和访问控制标记、医学遥感勘测等。

无线传感器需要在基本的 IC 层上设计，这是一个高度专业领域，许多研究组织的研究集中在这方面。本章给出了无线传感器和网络的一些例子。但是由于 IC 传感器的存在，无线通信设备可以通过使用现成的元件实现，具体内容见下节。

## 5.1.2 特定应用场合的嵌入式无线通信设备和网络

嵌入式无线通信设备包含了所有所需的元件，例如，传感器放大器、滤波器、信号调理器、转换器、微处理器和射频元件。图 5-1 为嵌入式无线通信设备的一个简单框图。设备运行所需信息、元件及构造在第 1 章和第 4 章中已经说明。对于适用于特定系统的嵌入式无线通信设备，本章给出了它的一些重要元件的例子，为设计者提供指导。

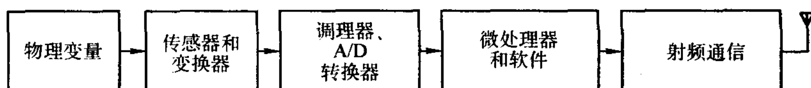



图 5-1 嵌入式无线通信设备框图

Honeywell 生产的 26PC 系列的压力传感器是典型的可在印制电路板生产线上组装的无线传感器。26PC SMT 支持测量、真空测量、差示、湿度传感器这些应用。虽然这些压力传感器最初是为医学工业设计，但仍可以用在工业表面安装压力传感器应用中。它们通过温度补偿和工厂校准，工作在 0 ~ 250psi 范围内。

Analog Devices 公司（http://www.analog.com/）为无线通信、视频和元器件的使用提供了 AD8131 和 AD8132 高速微分放大器。AD8131 有固定的增益、2400MHz 带宽和 2000V/μs 压摆率。AD8132 有可调整增益、350MHz 带宽和 1200 V/μs 压摆率，被设计用于多数微分信号处理应用中。两个设备都有 -70dB 输出平衡误差，可用在小外形集成电路（SOIC）和微型 SOIC 封装中。

Analog Devices 公司的 AD6644 单块集成电路可以精确地将宽带模拟信号

(200MHz 输入宽带信号）转换成适于多信道、多模式的数字接收机（软件无线电）信号，噪声为 74dB，抽样率为 65Msps，失真为 100dB 的伪自由动态范围（SFDR）。它的特征包括：低于 300 满量程的采样抖动，微分模拟信号输入，2s 补充兼容 3.3V CMOS 的数字信号输出。它的应用包括用于宽带系统例如 CDMA 和无线 CDMA 中的单信道数字接收机。AD6644 是有 52 个引脚的封装。

AD9226 由 Analog Devices 公司生产，是一个适合在蜂窝基站和软件无线电通信中使用的 65Msps 的 A/D 转换器。满功率输入带宽是 750MHz，并且该单元能以有效位数（ENOB）大于 11bit 的性能数字化宽带信号。与 AD922X 系列引脚兼容，A/D 转换器有一个片内采样/保持放大器，时钟工作循环稳定器和范围超出指示器，并且能够以 86.4dB 增益数字化一个 70MHz 中频（IF）信号。这个设备能够使中频收发机迅速改编以适应多路调制格式。其他应用包括无线本地环路、雷达和高速设备。

Texas Instruments 公司的 MSP430 系列超低功率 16bit 精简指令集计算机（RISC）混合信号处理器适合用在电池供电的测量设备中。功率消耗有 0.1μA 的 RAM 保持、0.8μA 实时时钟模式、250μA/每秒百万条指令（MIPS）。这些设备包括 A/D 转换器、D/A 转换器、运算放大器和一个比较器。该公司还提供 MSP430 的开发工具，包括 TI MSP430C 编译器、在线调试器、开发板和实时操作系统（RTOS）。MSP430 系列包括一个有 5 个中低功耗模式的灵活的时钟系统。该系列产品的特征是，在一个实时时钟工作的情况下，典型的备用电流消耗只有 0.8μA。总功耗低的原因是因为指令的执行速度快，且它有一个完全同步的高速系统时钟可以以少于 6μs 的时间从备用状态启动。

单芯片收发器广泛应用于各种特殊用途。图 5-2 说明了一个关于这方面的例子。为了实现在 ISM 频段传送和接收数据的目标，Texas Instruments 公司提供了无线电频率的集成电路组合。发射-接收产品支持的最大速率为 64kbit/s，频率范围为 315 ~ 950MHz。

Chipcon 公司（http://www.chipcon.com/）的 CC1010 是一个完全的射频单芯片系统。该设备将一个低功耗 300 ~ 1000MHz 频段的射频收发器与信息速率高达 76.8kbit/s 并与 8051 兼容的微型控制器相结合。这个微型控制器包括 32KB 内嵌可编程闪存、符合硬件数据加密标准的加密/解密器和一个三路 10bit A/D 转换器。这样便构成了一个可以实现无线通信，能够与传感器接口连接的嵌入系统。该设备还有 4 个定时器、2 个脉宽调制器、2 个 UART、实时时钟、看门狗（Watchdog）和 26 个常规 I/O 引脚。它完全遵循 EN 300 220 和 FCC CFR47 第 15 条例。

单芯片收发机的另一个例子是 Maxim Integrated Products 公司（http://www.maxim-ic.com/）的 MAX82XX 系列产品。MAX2828 和 MAX2829 是单、双

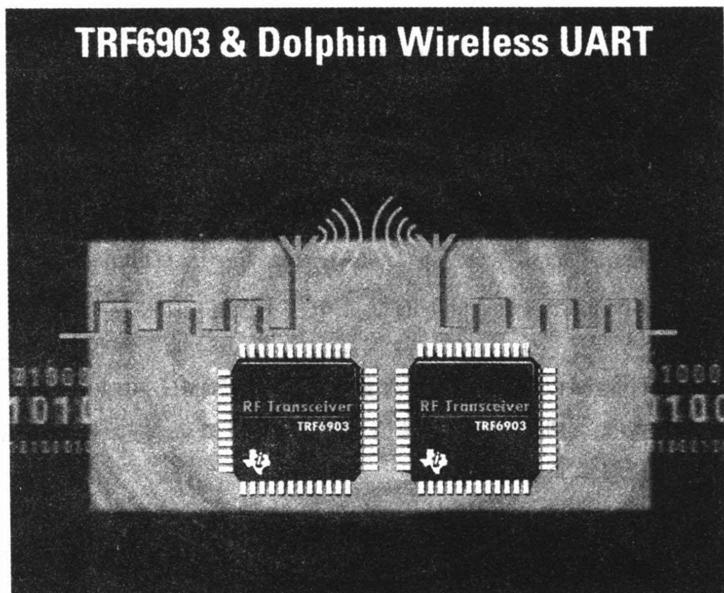



图 5-2 一个典型收发机例子（Courtesy of Texas Instruments：http：//www.chipcom.com）

频段的 IEEE802.11a/b/g 收发器集成芯片。MAX2825、MAX2826、MAX2827 是 2.4GHz/5GHz、单双路的 IEEE802.11g/a 接收器集成芯片。它们都基于专有的第二代硅锗两极 CMOS 处理。接收机在 2.4GHz 有 3.5dB 噪声系数，在 5.2GHz 有 4.5dB 噪声系数。这些设备可适用于 Wi-Fi 网络接入卡、接入点、无线路由器、笔记本的 Wi-Fi 外围微部件互连（PCI）卡，以及可移动手持设备的 Wi-Fi 模块。

AeroComm 公司（http：//www.aerocomm.com/）的 PKLR2400S-100 是一个大小为 1.65in×2.56in×0.20in，屏蔽的、待嵌入、跳频、扩频收发机，被设计用于任何在免授权 2.4GHz 频段上工作的工业系统。发射范围在室内可以达到 160m，视距范围下大于 3.3km。该设备单元为 OEM 主通信模块提供了一个异步 TTL 级串行接口（包括系统和配置信息），在点对点或点对多点的用户/服务器架构下进行操作。该设备有独立的 ConnexSync 技术，在通用集成电路上集成了紧密连接的接收器/发射器功能，提供更快的同步方案，从而实现了高数据传输速率。同样，可以采用 900MHz 和 848MHz 模块。

Applied Wireless（http：//www.applied-wireless.com/）提供了一系列 900MHz 发送接收模块，通过单一增益天线使信息发射范围达到 350m。在接收机上使用高增益的八木波道式天线（Yagi antenna）可以达到 1.5km。模块遵循 FCC 的第 15 条免许可要求。FCC 的第 15 条规定说明连续或规则发射间隔必须使用 900MHz 频段。900MHz 频段也可以用于周期性信息的发送。该产品线包括

T900FM（发射器）和 R900FM（接收器），适用于数据传输速率在10～200kbit/s间的中速数据传输。这些产品可以在表面安装，工作电压为3V，适用于远程控制、安全、RFID、遥感勘测、视频和信息发送等应用。它们同时也有300/400MHz模块，但是FCC的第15条规定限制了300/400MHz在远程控制中的使用。

有成千上万种类似的产品元件、合适的无线通信设备组件，其中一些在第1章和第4章中已经提到。

### 5.1.3 特定应用的模块及附加无线通信设备和网络

模块和附加系统是基于单机模块的集成，如图5-3所示。这种情况下，有模拟信号和数字数据输出的传统设备被连接到一个无线通信设备或射频模块。许多商业上可用的射频模块接受多路模拟或者数字输入并且提供射频输出。射频模块被设计成能接收多种形式的模拟输入，例如4～20mA、直流0～5V、直流0～10V等。在一些情况下，收发机与设备通过中间设施相结合，使设备的信号适于射频传输。其他特殊用途包括数据巡回检测、SCADA、油井、水井、工业厂房、处理厂、能源厂、天然气厂、流量、水面、电压、气流、温度、高低压、张力、液面、倾角计、天然气勘探和加速计。

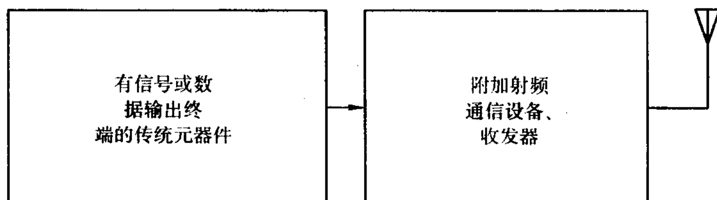



图 5-3　一个附加的无线元器件

无线电频率模块和附加设备以各种方式工作在不同的频率上。这些频率可能是在免许可的ISM频段或其他频段。在当前的应用中，两个标准是特别重要的：蓝牙和IEEE802.11。蓝牙标准在第3章和第4章中已作讲解。由于IEEE802.11的重要性越来越强，所以接下来重点讲解它在特殊场合中的应用。

基于IEEE802.11的网络和元件设计在免执照的2.4GHz ISM频段工作。FCC规定中陈述了FHSS技术和DSSS技术的使用。FHSS系统的目标是低投入、低功耗、短距离和低数据传输速率应用。DSSS和FHSS技术的应用包括蓝牙、SWAP、DECT和IEEE802.11。DSSS IEEE802.11b系统为了实现高速的数据传输速率及长距离的传输，往往需要大功耗。目前IEEE802.11 FHSS系统支持的数据传输速率达到1.6Mbit/s，但是需要5MHz信道带宽分配。宽带跳频使速率可以达到10Mbit/s。这将使FHSS系统和目前数据传输速率达到11Mbit/s的DSSS系统竞争。

对于FHSS，使用2MHz的下保护带和3.5MHz的上保护带，2.4～2.835GHz

频段可以被分成75个1MHz信道。所有的FHSS系统都是基于TDMA的，每秒钟的跳频次数由不同的标准确定。蓝牙和DECT使用高斯移频键控（GFSK）的调制方法，而HomeRF和FHSS802.11采用两路和四路的FSK调制，更好地利用了饱和功率放大器提供的更高功效。

对于FHSS无线通信系统来说，有很多单射频集成电路发射器解决方案。很多收发器在一个芯片上包含了低噪声放大器、功率放大器、功率放大驱动器、压控振荡器（VCO）和倍频器。通常功率放大器集成了一个功率检测器和闭环功率控制器，在所提供的电压、温度和输入功率的全范围内实现几乎恒定的输出功率。一些功率放大器包含模拟增益控制、集成输入匹配和低功率关闭模式。带有附加电路的VCO，例如一个集成振荡回路和片内二极管，为直接跳频应用提供最优线性调制输入。在一些情况下，VCO后的倍频器将低频转换到2.4GHz范围内。

有些模块用在现有设备上使其具备无线功能，微型信息发射器便是其中一个典型的例子。比如，APT Instruments公司（http：//www.aptinstruments.com/）的DL160系列射频发射器是电池供电大小为54mm×35mm×15mm的设备，能够向连接在计算机串口上的接收天线发送信息；分辨率是16bit，工作在418MHz，信号范围可以达到250m。射频发射器在传感器、监控器、控制器和信息收集器之间提供监控信号和控制信号的无线转换。无线通信系统精简配置，以使其能够避免到达位置和接地回路的问题。该公司提供了7种模型；传感器可以内置，也可以通过螺纹接线端连接。时间抽样信息和日期标记数据被存储在电脑中。Logger使用其内含的与Windows兼容的软件可以被安装在电脑中。大多数的模型都采用NIST的可跟踪标准。

Quatech公司（http：//www.quatech.com/）为它生产的用于远程数据采集和信号调理的QTM-8000提供了QTM-8524 DSSS射频调制解调器模块。这个模块使用了高斯最小移频键控（GMSK）调制，工作在2.4GHz频段，并且能够将射频信号转换为串行RS-232或者RS-485信号，以与电脑或串行网络通信。数据采集模块的标准集包括一个室内/室外安装在墙上的旋转天线或一个安装在天花板上的天线。这些设备适用于构建个人电脑及PLC间的通信网。QTMSuite软件包含一个可配置I/O参数及可通过网络发送命令的基于Windows的功能体。构建一个无线通信系统至少需要两个QTM-8524模块。在更复杂的应用中，QTMSuite提供一个服务器、32位Windows动态链接库、ActiveX OCX控件、一个通用LabView虚拟元件库和一个通用的DASYLab。双看门狗保护功能使网络部分失效可能造成的损失最小化。该系统能够同时使用多个模块以不同的信息格式工作在不同的波特率和频率上。对整个系统的控制可以通过PC利用其标准串口实现。

Otek公司（http：//www.otekcorp.com/）的TR300系列收发机是为个人电

脑之间无线通信的即插即用应用而生产的。TR300 通过它的串口（RS-232/485/TTL）接收信息、存储信息（达到 72 字符）、自动转换信息并以 19.2kbit/s 或 115.2bit/s（OOK 或 ASK 调制，工作在 ISM 频带）发送信息到另一个无线终端，由它接收信息并转换为串行信号。峰值传输功率是 1mW。高达 15 个节点，外加一个控制器通过内建的地址交换来寻址。这些设备同时提供了电脑软件、操作指南和安装指南。

原始设备制造商（OEM）就是制造设备并将它们卖给经销商的公司。Maxstream 公司（http://www.maxstream.net/）的产品就是这些设备中的例子。Maxstream 公司的 9XTend 射频模块提供 256bit AES 安全保护。它可以应用在对等、点对点和点对多点通信中。它使用 10 个跳频信道的 FHSS，每个信道在 3 个网络筛选层上有超过 65000 个可能的网络地址。主接口波特率在 1200 ~ 230400bit/s 之间变换。包括停止工作引脚、周期休眠和串口休眠在内的多种低功率模式使得电流消耗只有 1μA。该设备在 9600bit/s 下可通信范围高达视距 64km，在 115200bit/s 下可通信范围高达视距 32km；在 9600bit/s 下室内/市区通信距离达到 900m，而在 115200bit/s 下室内/市区通信距离达到 450m。它工作电压在 2.8 ~ 5.5V 之间，输出功率为 1W。它的功率输出可通过软件调理控制在 1mW ~ 1W 之间。在 9600bit/s 时，接收器的灵敏度为 -110dBm。

便携式无线调制解调器，如图 5-4 所示，代表了一系列能在无线通信网络中应用的产品。Monicor Electronic 公司（http://www.monicor.com/）生产的 IC-100MES 是一个内置一块镍氢电池的网络无线调制解调器。该调制解调器工作在窄带 FM（450 ~ 470MHz）上，发射功率为 250mW。通过内置一个短天线，通信范围可以达到视距 1.6km。外置天线可以使通信范围更大。RS-232 接口有可选波特率，单个接口可以以 4800bit/s 最高速率传输 ASCⅡ 数据、控制码字和协议比特。主机和基站间的最高数据传输速率可以达到 19.2kbit/s，并且使用 16 位错误检测修正技术。通信协议是基于碰撞检测的扫描序列，或者是与 RS-422/485 兼容的多路广播。便携电脑、笔记本电脑或其他外部设备作为节点的数量最多可以达到 99 个，并工作在点对点、联网或者多路模式。

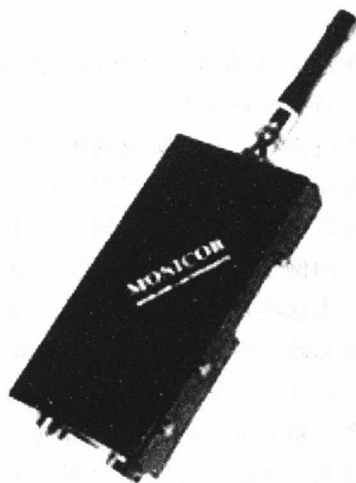


图 5-4　便携式无线调制解调器
（由 Monicor Electronic 公司提供，http://www.monicor.com/ic100mes.html）

使用 2.4GHz 的 FHSS 数据和感知接口系统的 Wave-Lynk CT-4000 系列是 Wave-Lynk Wireless 公司（http：//www.wave-lynk.com/）的产品，这些产品可以使高速的无线数据应用在业务较多的行业和感知应用方面，而且基站和主机间的视距传输距离可以达到 16km。NEMA 4X 和 IP66-rated 设备（其中 IP 代表 Ingress Progress）有 10mW 和 100mW 两种可用的版本，并且配备了 RS-232 接口和高阻抗的感知网桥接口。还有使用电池的嵌入式系统的自定义版本。

Omnispread Communications 公司（http：//www.omnispread.com/）的 Copy Cat 数字系统，使用了扩频和无线分组技术，并工作于 915MHz 频段。每个 Copy Cat 数字系统都是事先在工厂调整好的即插即用系统。无线分组技术在开始时需要 10ms 时间来进行命令交换，以降低干扰的可能性。如果发生干扰，系统就进行避退，直到命令交换被正确执行。这个公司还为射频网络提供了类似的产品，例如 LAWNII + starter kit，用在距离达到 4.6km 的点对点网络。其中包含了两个 LAWNII + radios、两个 8.5 dB 八木天线、低损耗的射频电缆、带有供电设备的数据接口电缆、两件铝制雨衣、LAWN3.0 终端软件和一本手册。

还有许多其他的设备，专门用于网络的特殊应用。

## 5.2 商用无线传感器和元器件

在过去 10 年里，虽然已经出现了无线元器件和网络，但是很稀少并且成本很高，只有少数几个公司生产。如今，许多公司都针对特殊市场提供了增值的无线解决方案。某些集成的传感器和收发机降低了系统的成本。现在用不到 20 美元就可以得到扩频收发机，原来遥不可及的应用现在也慢慢进入了人们的视线。数以千计的无线产品出现在市场上。本节进一步介绍了一些无线传感器和元器件的例子。其中一些已经在第 4 章中给出。

应用这些技术的一个重要的发展就是，窄带收发机正逐渐被使用扩频技术的宽带和超宽带系统所代替。窄带系统适合用在严酷的环境中。市场上最新的无线产品几乎全部是扩频产品，而且直扩和跳频之间的竞争仍在继续。最新的竞争者，超宽带，正在抢占市场，但是离成功还有一段距离。然而，最近几年来，超宽带逐渐成为实际应用中重要的选择。下面介绍一些商用无线传感器和元器件的例子。

TorqueTrak 9000 来自 Binsfeld Engineering 公司（http：//www.binsfeld.com/），使用电池供电的小型传输机，可以安装在转轴上并根据转轴的灵敏程度来广播数字信息，并把转轴的参数转换给转轴传感器。传输机的工作频率是 903 ~ 922MHz，传输距离大约是 10m。这个系统是基于微处理器的系统，并且有 7 种用户可选的增益设置、8 种用户可选的广播频段、自动归零、低电量指

示器。接收机可以接收来自 8 个不同传输机的信号。系统的分辨能力是 14bit，频率响应为 0～500Hz。

无线传感器控制器用来监视和控制传感器。比方说，高级嵌入系统（http：//www. advancedembedded. com/）的 RMT10 可以接收不同标准传感器输入，并提供 D/A 转换。它既可以存储数据，也可以通过一个 RS-232 来建立连接。无线连接内置了一个 Maxstream ConnexRF 收发模块，可以在免授权的 2. 4GHz 上进行点对多点的通信。收发机使用 FHSS 技术，提供室内和室外的通信。特点包括两个模拟输入、两个模拟输出、一个 NEMA 4 附件、2. 4GHz 工作频率、信道跳频和无线分组技术。

Mastery Instruments 公司（http：//www. masteryinstruments. com/）的 WAU80/160 是一个 8 信道/16 信道的、500ksps 的 12 位 D/A 系统，还包括一个与数据采集计算机的无线连接。这个无线连接工作在 2. 4GHz，采用 FHSS 技术，其特点为采用自动错误重传技术和高达 5ksps 实时数据传输速率，而且视距传输范围可以达到 3. 3km。在接收端需要安装 TF115 普通数字调制解调器。板载的缓存为 48MB，并包括一个 LabView 驱动，附件是 NEMA4。

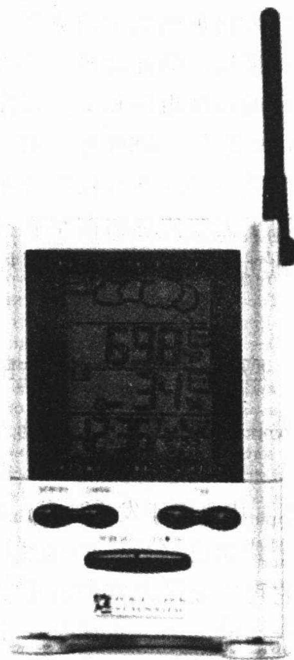


图 5-5　无线气象台（图片经过 Oregon Scientific 公司的许可，http：//www2. oregonscientific. com /）

无线气象台具有广泛的专业和普通消费级别的应用。图 5-5 为一个用于室内或室外的无线气象台。这个无线传感器检测并显示室内、室外的温度和湿度。室外模式可以支持 3 个传感器。另外，Oregon Scientific 公司（http：//www2. oregonscientific. com/）也提供了一系列的气象台产品。

无线气象台的另一个例子就是 Strison Wireless Systems 公司（http：//www. strison. com/）的 Cell-Alert AWS-2100 无线因特网遥感勘测气象台，可以使用目前蜂窝网络的空闲信道在整个北美发送数字分组数据。这个系统被设计用于检测小气候，使用太阳能供电，可以检测周围的温度、相对湿度、风速风向、降雨量、阳光辐射强度和地表温度。测量值被储存，并在规定好的时间内连同有关最大值、最小值、总和和计算值等数据发送出去。紧急事件会实时发送。发送的数据由公司接收，并进行存储、处理。

## 5.3 研发中的无线元器件和传感器网络

目前有许多处于研究和开发（R&D）阶段的项目，目的是提高无线传感器和元器件网络的硬件、软件、固件的性能。研发主要集中在3个领域：设备操作的软硬件方面以及物理层，物理层和网络层的效率，基于OSI参考模型的物理层和网络层的协议和网络管理。

大多数研发项目的目的都是提供一个基础架构和中间件来支持传感器网络的复杂操作。经典方法就是采用低功率和高密度的硬件节点。在硬件方面最突出的研究来自加州大学伯克利分校。Mote无线通信系统已经商用化，并被许多研究人员采用。除此之外，还有其他的无线通信系统原型，通常都基于已经商用的流行的硬件组件和支撑软件。

Beutel等人（2004年）报道了一项基于BT节点的动态传感器网络的研究。这项研究关注于固件与软件的开发，下一节会进行详细介绍。对于BT节点的研究，表明了无线传感器网络在操作方面和物理层的研究方向。无线传感器网络的效率和功率问题将在5.3.2节进行讨论，网络管理的问题会在5.3.3节进行讨论。

### 5.3.1 应用层和物理层上的软硬件问题

研发在硬件和软件方面投入了很大的精力。一些研发集中在芯片上来设计构造一个独立的、低成本的无线传感器和元器件（例如S. Q. Wang等人，2004年），然而其他的研发主要关注的是现有设备的改进和小型化。

一个使用已经建立的标准的研发例子就是BT节点。BT节点基于无线蓝牙技术，它可以提供丰富的具有蓝牙功能的设备、中继器、基础网关和用户接口来配置全新的系统。蓝牙是一个交互式无线通信网络标准，并被广泛地应用于PDA、笔记本电脑、移动电话、数码相机等消费产品上。蓝牙还可以作为硬件的扩展，比如USB、RS-232接口和PCM-CIA卡等。蓝牙技术可以与不同的设备实现交互操作而且配置简单，这使其成为一种很实用的技术，可以用于无线传感器网络等各种全新应用中。

在5.1节中讲过，传感器可以配置成为单个、独立的节点，并需要适当的处理器、无线通信设备、电源等支持。这些节点所组成的大密度、大规模网络可以用来监测大量的自然现象或者进行分布式处理。然而，由于典型的传感器节点只能感知很小范围内的环境情况，所以也只能提供有限的有关系统的信息。因此，每个传感器节点都需要和其他节点交换信息来弥补其不足之处，并共享有限的资源。

对于系统概念的相关研究表明，可以允许节点间进行信息的交互。这种节点间的交互称为分布式定向图空间。无线传感器网络连接到后端的基础网络，来为节点分配任务，进行数据存储，并对结果进行评估，同样需要外部的电源来为大量的计算提供能量。通常来讲，每个节点的可用资源是有限的，所以不能进行集中的数据处理；这种服务一般是由具有丰富计算、存储资源的外部设备来提供，比如因特网、大型基站。

在BT节点的一个原型应用中（由Beutel等人报导，2004年），这些硬件由带有芯片存储器的Atmel Atmega128L微型控制器和外围设备组成。Atmel Atmega128L微型控制器的特点是有一个8bit的RISC核，在高达8MHz频率上以8Mips的速度传递指令。板载内存由128KB嵌入式可编程闪存、4KB SRAM、4KB EEPROM构成。其他的集成元件有调试软件、定时器、计数器、脉冲调制器、10bit A/D转换器、内置IC总线和两个UART硬件。外置的低功率SRAM为BT节点提供了附加的240KB数据内存。当设备处于低功率休眠模式时，外置的石英振荡器支持计时更新功能。对于无线传输机，可以使用可拆卸的模块载体把爱立信蓝牙模块和微型控制器的某个串行接口，以及集成在电路板上的平面倒F天线连接起来。

使用BT节点的网络解决方案已经被应用到网关上，它可以桥接无线传感器网络和因特网。成熟的蓝牙设备已经应用到这种网络中，具有蓝牙功能的台式电脑、笔记本电脑可以在这种网络和无线局域网中充当网桥。值得一提的是，具有蓝牙功能的手机也在一些实际应用中进行信息的传输。

无线传感器网络的算法以及算法应用的开发由于一些原因也是一项很重要的任务。首先，传感器网络是高度动态的分布式系统；第二，网络的性能在很大程度上取决于物理环境；第三，出于节省能源的考虑，网络需要把内网的数据进行处理、集成，以最小化所需传输的数据量。为了检验调试系统，开发者需要非常了解传感器的原始数据和网络的总体输出数据。

BT节点中的软件是由受中断驱动的低层驱动软件、调度多线程的调度程序组成的。对于只需要简单的I/O、监视和无线通信功能的小型网络设备来说，这种操作系统最合适。使用这种操作系统，可以开发事件驱动的程序以处理小事件。通过把较大的任务分成较小的部分，然后作为小事件来解决。

蓝牙软件包提供了联网和驱动功能。蓝牙规范的部分功能已经被应用于其中，而且通过应用程序的接口就可以对其进行访问。蓝牙的连接管理功能位于L2CAP层中。RFCOMM串行端口提供了与电脑终端、数码相机、移动电话等设备的连接功能。通过RFCOMM端口，BT节点可以使用移动电话拨打应用服务器，或者使用GSM的其他业务。

在对BT节点的研究中，系统软件的设计不仅考虑了便携性能，而且可以应

用于嵌入式平台以及其他仿真环境（x86、iPAQ Linux、Cygwin 和 Mac OS X）中。仿真简化了开发过程，并加快了调试环节。BT 节点系统软件包由开发环境（avr-gcc 逆编译器和标准库）、源代码、调试支持部分、演示实例和文档组成。

除了核心系统软件以外，BT 节点平台还提供了把传感器节点并入到其周围通信基础设施的功能，以便交换、协同处理本地分布式传感器的数据。

BT 节点系统所提供的服务可以把移动电话当作基础网络的网关来使用。把标准高级技术（AT）指令通过蓝牙的串行端口规范、拨号网络规范发送给附近的电话后，就可以建立起 BT 节点和附近的电话的连接。AT 指令使用基础网络服务器来管理和控制 GSM 的数据连接。另外，BT 节点还可以把传感器数据转换成短信业务，并发送出去。

对于无线通信网络的能源消耗问题的研究已经做得相当完善。蓝牙技术的一个不足之处就是需要较长的时间来建立连接，而且考虑到网络拓扑结构的关系，其自由度也比较低。另一方面，蓝牙的面向连接的特点保证了不同设备之间的交互性，也就有了标准化的接口。与许多低功率的无线电设备相比，蓝牙还提供了非常高的带宽。标准主控制器、人机交互接口提供了一个高层的接口，并不需要基本的频带和媒体接入层的相关信息。因此，蓝牙具有许多内置的高层功能：同步/非同步通信、复用、集成音频、前向错误修正、自动包传输、用户鉴权、串口仿真、IP 连接等功能。

Siegemund 和 Krauer（2004 年）对 BT 节点进行了深入研究，把 handheld 同环境中的智能设备合并到一起。他们的文章解释了智能设备怎样通过自发地利用周围移动用户设备来获取资源。在他们的应用程序中，handheld 与协同的智能设备共享一个分布式数据结构，而这些数据对于程序是透明的，智能设备决定了这些数据存放的位置。智能设备把计算结果输出给 handheld 并由此获得资源。最后，由于移动用户设备的较好的存储和处理能力，智能设备把图形用户接口转移到邻近的 handdeld 上，以方便共同处理传感器的数据。

### 5.3.2　物理层和网络层上的效率

在无线传感器、元器件以及网络中，有效性是很重要的问题。传统的元器件和系统需要两种线缆：一种用来通信；另一种用来供电。无线通信不需要通信线缆，因此传感器具有便携性和移动性。很显然，如果传感器和元器件可以自己供电，那么就不需要线缆了。所以，无线通信系统的能耗问题是一个很重要的研究热点。

许多无线嵌入式系统，比如多媒体终端、传感器节点和传感器网络，由于电池电量有限，都使用软件来对计算和通信加以限制。总的电量消耗包括传感器、传感器支撑电路、收发机和相关电路、微处理器等所有的电量消耗。

在数字电路、无线通信、电池技术和微电子方面的进步使得传感器和元器件的体积更小，成本更低，而且用途更多，也更加稳定可靠。虽然这些进步使得物理层的电量消耗显著减少，但是系统也变得非常复杂，导致操作过程中电量消耗的增加。不过，通过分别于单个设备级别和网络级别来提高整个系统的能源有效性，可以使电量的消耗最小化。无线元器件及应用系统的能源效率和利用可以分为以下 3 个方面：

- 功率效率可以通过合理的能效选择、低能耗元件，和对单个节点的有效电路配置来实现。
- 功率效率可以通过在节点级别使用合理的软件，特别是智能传感器系统来实现。
- 网络中的能源有效性可以通过有效的网络管理来实现。

每台元器件的能源需求取决于其操作特性。目前设计能源有效的电子元器件的一个新的趋势就是在软件辅助下的能源消耗管理。如在分布式传感器网络中，当代大部分元器件都使用数字信号处理、中央处理单元，或者专用集成电路，甚至通信设备。在大多数的实际应用中，并不是所有的系统元素都需要进行连续操作。因此，根据电路的操作需要来调整其表现性能显著地节省能源。

CMOS 逻辑设备的能源消耗由下面的方程（Caldari 等人，2002 年；Sinha 等人，2002 年）决定：

$$P = f_{sw} \times C \times V^2 \tag{5-1}$$

式中，$P$ 为能量；$f$ 为频率；$V$ 为电压。降低电压和频率可以显著地降低能源的消耗。

实现功率效率有多种方法：在整个网络中应用电源管理机制；使用低能耗的混合信号电路（例如，Microchip Technology 公司的 PIC16LF877）；选择低能耗的射频收发机；优化单个节点和节点簇的计算需求。另外，使用节电元件也可以节省能源。

动态电压调整（DVS）技术适合于动态电源管理。使用这种方法，操作的电压和频率可以根据系统的实时需求进行调整，使得能源消耗显著降低（Duarte 等人，2002 年）。供电电压被降低到最低水平，同时可以满足设备性能标准。在网络级别，DVS 以多种方式进行操作，例如，根据整个系统的需求，来调整每个设备的操作电压和频率。

动态能量管理技术可以使电路或者部分电路工作在不同的模式下，比如空闲模式、等待模式、停止模式等不同的性能模式（Rong 和 Pedram，2002 年）。系统资源的实时需求决定了应当进入哪种模式。

能量测量和能量感知也可以用来节省能源。一个能源感知系统检测可用的能量，并动态地调整硬件参数来满足延迟、性能需求。

近些年来，出现了多种智能无线微型传感器。这些设备具有自维护、健壮性强等特点，可以免维护地操作使用。这些传感器能够在分布式网络中工作，并与其他的传感器或者数字设备协同工作。在这些设备当中，低能耗的计算能力非常重要，特别是在有很多传感器的网络中。高能耗数字电路的每一次操作都很关键。

能量测量是一个新趋势，这种技术需要系统适应时变的操作环境。这与低能耗的设计方法是不同的。能量感知电路监测其可用的能量，并动态地调整硬件参数来满足延迟、性能需求（Zhang 和 Chakrabarty，2003 年）。

当今的无线通信系统，特别是分布式传感器网络中的系统，使用扩展的加密、解密措施来保证信息流的安全。通信设备的安全需求需要进行大量的计算并消耗掉很大一部分能量（Yuan 和 Gang，2002 年）。由于计算而消耗能量的问题可以由包括 DVS 在内的多种技术解决。

### 5.3.3 通信协议和网络管理方面的问题

本节将会讨论研究人员比较关注的一些问题。由于 ad hoc 网络相对来说比较前沿，并且吸引了大量研究人员的关注，所以首先在这个领域进行讨论。

无线通信系统的管理与传统网络的管理有很大不同，因此网络管理的研究也引人注目。实现 ad hoc 网络相当困难，这需要各种算法的支持（例如，Sriram 等人，2004 年；K. Wang 等人，2004 年）。多个自组织移动节点通过无线链路互联互通，就构成了移动 ad hoc 网络。然而，由于没有固定的基础网络，比如说基站，移动主机为了网络的连通性需要担负起路由功能（Boukerche，2004 年）。因此，大量的路由协议被提出并实施，比如 AODV 路由协议、PAODV 路由协议、CBRP 路由协议、DSR 路由协议、DSDV 路由协议。由于面临这些新的挑战，研究人员正在关注一系列的问题，下面对其中一些问题进行阐述。

ad hoc 网络具有动态、环境不可预测的特点，再加上无线通信网络资源的缺乏，这样就会限制甚至不可能使用传统的自动配置协议。自动配置的问题可能会由于 ad hoc 网络的高度移动性而更加恶化。例如，动态注册和配置协议（DRCP）是自动配置协议，用来在不可预测的 ad hoc 无线通信网络环境中方便实施动态、快捷、有效地配置。在现实的操作条件下，这种协议可能会有性能、收敛时间、开销、扩展性等问题，这也是一个研究挑战。

入侵检测是无线通信网络的另一个研究领域。无线通信网络很容易受到入侵，因为其使用开放的媒介和协同策略进行网络通信。一种移动特工技术，可以合并多个网络传感器的检查数据，并分析网络的入侵情况。与许多为有线通信网络设计的入侵检测系统相比，移动特工技术使用了连续带宽的框架，并在多个层次上定位入侵者。利用这种方法，可以把 ad hoc 无线通信网络管理、决

策的分布式特性考虑进来（Kachirski 和 Guha，2002 年）。

由于 ad hoc 无线通信网络具有动态特点，其 QoS 也是一个研究挑战。QoS 机制需要协议栈中所有层的紧密协作。这个机制的基础是 MAC 层的 QoS。在 ad hoc 无线通信网络中，广泛地使用了 IEEE802.11 标准提出的分布式协调功能（DCF），这是一个随机接入机制，但是会产生公平性问题。为了保证最小的吞吐量并提高带宽分配的公平性，许多研究人员提出了一系列避免碰撞的 MAC 层调度算法。然而，当实施这些算法时，需要预先知道能够连接到网络的节点的标示号和共享这个机制的邻区信息。这些算法可以保证最小的吞吐量要求，而且不依赖于每个包的信息交换。研究结果表明这些算法与 IEEE802.11 相比可以提供更好的长期的公平性（Fang 等人，2004 年）。

ad hoc 网络中的路由信息由于其复杂性，吸引了大量的关注。因为网络拓扑结构可能不断改变，而且可用的带宽非常有限，所以如果系统不能满足某一条路径上的带宽需求，就会产生呼叫阻塞的情况。因此，就必须有多条并行路径，这些路径的带宽之和要满足带宽的需求，而且不能超过延时的规定范围。可选择的路由路径的 QoS 可以减少系统的阻塞概率，并更好地利用网络资源。搜寻并行路径的过程需要至少 3 个参数：最大带宽、最短路径以及带宽与跳数的最大比值，以满足所有路径总的带宽需求（Wu 等人，2004 年）。

路由可以通过分布式路由、本地路由和全局路由等算法来实现（Kuruvila 等人，2004 年）。在分布式路由算法中，收到数据包的节点选择一个离目的节点最近的邻居节点进行转发。这样既使能量比率和（或）成本最小化，又拉近了到目的节点的距离。在本地路由算法中，每个节点仅仅根据其所处位置、邻节点和目的节点来作出路由决策。全局路由算法基于最短加权路径机制。许多讨论目前集中于不同种类的算法及其属性。

ad hoc 网络中进行传输控制需要认真地对通信协议进行设计。大多数 ad hoc 网络中的路由协议都把到达任意给定目的地的具有最少跳数的路径看成最佳路径。然而，这种策略会在网络中产生拥塞区域，严重地降低了路由协议的性能。在一些情况下，根据流量的大小来选择路径可以平衡网络的负载（Kawadia 等人，2001 年），其中用一些数学方法来产生在节点间交换的伪随机数种子。要把这种信息交换融合到 OSI 参考模型中，需要对软件进行认真设计。

## 5.4　工业化无线传感器和元器件网络

2002 年 7 月，美国能源部下属的产业技术计划项目在加利福尼亚的旧金山召开了一次研讨会，来讨论无线技术产业的未来。与会的 34 位厂商专家代表、用户高校代表、国家实验室和独立顾问一致认为到 2010 年：

- 无线传感器网络会广泛应用于美国的工业。
- 无线通信网络的传感器和其他元件将会是智能化的，能够根据不同的环境来改变功能。
- 无线通信网络及其元件将会是自控制、自配置、自核准、自识别、自组织的。在其工作周期内部需要进行维护。
- 无线通信网络将会在安装、维护、升级、替换、故障率、快速授权等方面优于有线通信网络。
- 由于加密技术和其他的安全措施，无线通信网络的安全性能将会赶上甚至超过有线通信网络。
- 无线通信系统将是独立操作，而且有很大的冗余。
- 无线传感器能耗会更低，而且会减少90%的操作成本。
- 开放式传感器架构将会实现数据间的无缝操作，与设备的生产厂商无关。
- 无线通信系统的安装成本将会是2002年的十分之一。
- 无线传感器网络有能力在生产自动化、处理自动化、SCADA和遥感勘测系统等领域掀起一场革命。
- 高级无线传感器的使用将会提高10%的生产效率，同时降低25%的工业排放。
- 尽管无线传感器技术取得了巨大的进步，但是创新仍需要开发人员与工业企业相互协调。
- 无线传感器系统可能会与一些企业的文化产生对立，特别是由于其具有自动化操作的能力。

在过去的几年时间里，我们已经向预期迈出了重要的几步。销售商提供了上千种产品，但是终端用户在实施无线通信系统时却很谨慎。然而，如今的无线通信网络与有线系统共存，并在逐渐取而代之。

无线通信网络的用途很广泛：对偏远地区的长期监测、运行过程中的数据采集、检测项目的经济动向、进程控制等。无线通信网络可以在处理过程中提供快速确认，因此在多种应用中具有多功能性和灵活性。无线域单元由集成元器件或传感器、射频通信系统、电源和集成显示器（显示处理变量数据、历史记录和网络记录，例如信号强度、电源寿命和通信错误等）构成。

在无线传感器系统的构建过程中，每个无线域单元都分配一个识别码，并可以与其他设备进行通信。虽然ad hoc网络技术已经可以实施，但是大部分工业无线通信网络都需要一个基站来与这些现场设备通信。中央通信站的方法更加增加了操作的可靠性。基站与现场设备交换信息，并当接收到信息后提供反馈。通常特定服务器上运行的软件用来管理无线通信网络。大多数系统提供管理控制台来进行实时监控、配置管理和报告。

当设置无线通信系统时，需要考虑许多因素，如图 5-6a 所示。例如，需要成立一个项目团队来考虑实施环节和系统所能带来的优势，比如远程测试和校准。重要的一点是在执行这些工作前要做好应对这些变化的准备。一旦这个组织决定实行无线通信网络，就有如图 5-6b 所示的一些需要考虑的重要问题，比如成功的项目协调、可用产品范围的调查、可用的技术支持。来自销售商和其他项目伙伴的技术支持是非常重要的。

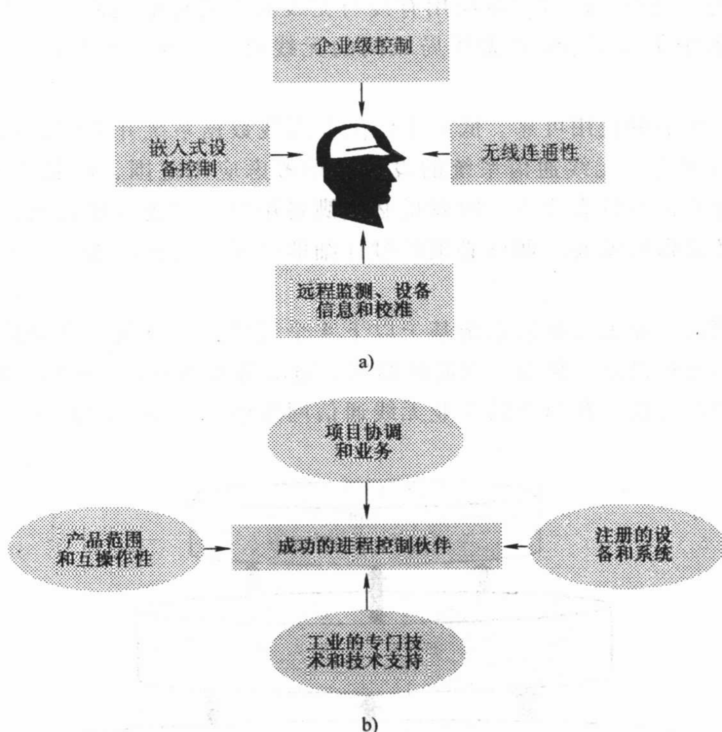



图 5-6　建立工业无线通信网络的重要因素

与其他的网络一样，工业无线传感器网络使用 OSI 参考模型的协议和一部分频段（包括 ISM 频段）。无线射频传感器、传输机、记录器、中继器、接收机和服务器组成了一个体系，覆盖 418MHz ~ 2.4GHz 频段。大多数系统不需要 FCC 认证。多频传输、DSSS、FHSS 技术都已经成功应用。本节介绍了无线通信系统工业应用的一些例子。

无线传感器和元器件已经在工业中应用了很多年，包括产品及控制、材料处理、军事应用、安全系统的操作与维护、仓库管理等。虽然应用领域多种多样，但是总的来说主要为两种工业系统：

- 无线传感器和元器件与现场总线设备的集成，以及工厂车间的完备的无

线通信网络。

- 无线嵌入式检测和条件监测。

### 5.4.1　无线通信系统和现场总线的集成

对工业网络进行无线拓展的优势已经被广泛认同。然而，现场总线与无线的集成必须保证在维护有线通信网络解决方案的质量的同时，还应当具有实时操作的能力。当今，许多工业应用有线与无线混合的传输机制。一些系统在现场总线技术中集成了3G和无线局域网的无线技术（IEEE802.11b、HiperLAN等）。

设计、安装并使用可靠、低成本的工业无线数据系统并不需要比有线系统付出更多的努力。无线通信系统的设计必须考虑应用范围、产品使用等因素，使系统工作在最好状态之下。收发机必须满足用户终端进行正确数据传输的能耗需求。传感器的安装、调试必须经过详细的电子、机械审查，为工业操作做好准备。

大规模的工业无线通信系统基于以下4个元件：计算机、现场总线、现场设备和数据处理设备（例如，调制解调器、路由器和网关）。图5-7显示了这些元件间的相互关系。在当今的工业无线通信网络中，调制解调器和网关具有重要的作用。

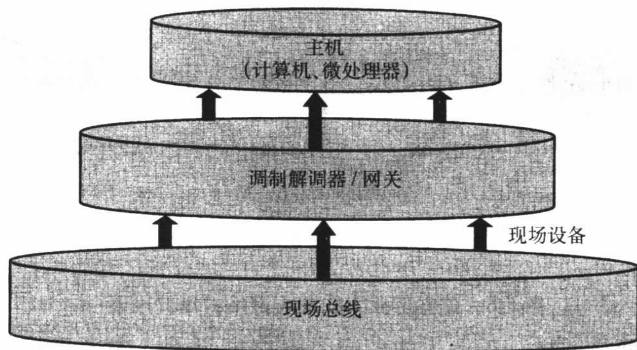



图5-7　无线工业系统的结构

目前，调制解调器是工业无线传感器、元器件的骨干设备，如同工业设备的通信端口（如RS-232）。在遥感测量中，调制解调器的作用是在现场设备和计算机之间或者现场设备本身之间进行无线数据传输。无线工业应用中，调制解调器主要用在以下两个方面：小范围的和大范围的。任何大范围的调制解调器都可以用在小范围的应用中。但是对于低成本的应用，有多种小范围的调制解调器可以用在100m或更小的范围内。

2.4GHz频段已经获得了广泛认同，并且应该用在那些需要全球认证的频段

的应用中。有许多具有蓝牙、Wi-Fi 功能的工业设备都使用 2.4GHz 频段。如果是在北美，还可以使用 900MHz 频段的产品。900MHz 频段在北美广泛应用，并具有远距离通信的特性。在 2.4GHz 和 900MHz 频段，许多无线产品都具有 USB、RS-232、RS-422、RS-485 和以太网接口。然而，对于使用许可和免许可的频段进行无线遥感勘测，不同国家有不同的频段管理条例。以下是无线遥感勘测系统可以使用的频段：

- 北美：免许可的 900MHz 频段和许可的 400 ~ 500MHz 固定频段。
- 南美：免许可的 900MHz 频段和许可的 400 ~ 500MHz 固定频段。
- 亚洲：免许可的 450MHz 频段（新加坡、中国香港），免许可的 220MHz 固定频段（中国），许可的 400 ~ 500MHz 固定频段（大多数国家）。
- 欧洲：免许可的 433MHz（所有国家）、400MHz（英国、瑞典、芬兰、西班牙、葡萄牙、波兰、捷克）、869MHz 在 500mW 输出和 10% 占空比或者 5mW 输出和 100% 占空比（大多数国家），许可的 450MHz（大多数国家）。
- 非洲：免许可的 433MHz（一些国家）和许可的 400 ~ 500MHz 固定频段。
- 中东：免许可的 900MHz 频段（一些国家）和许可的 400 ~ 500MHz 固定频段（大多数国家）。

无线网关在大规模应用中用来连接 PLC、计算机和现场设备（见图 5-8）。网关可以连接工业设备使用的不同的数据总线。它们连接计算机、PLC、数据控制系统和 SCADA 网络，这些设备可能工作在不同的协议之下。网关被广泛应用在工业现场总线上，例如以太网、Modbus Plus、Profibus、设备网、DF1 和 Modbus。典型的操作频段为 220MHz、450MHz、869MHz 和 900MHz。

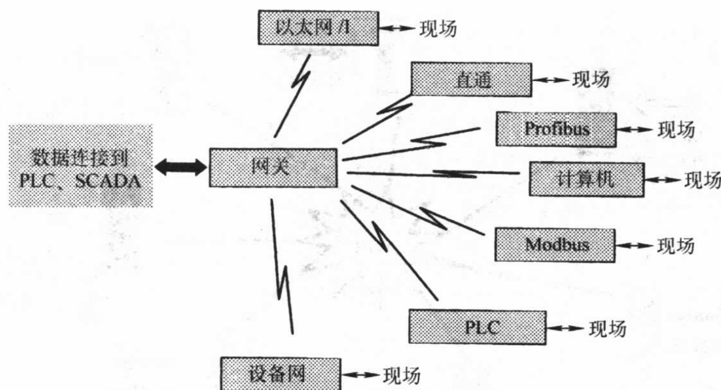



图 5-8　使用无线网关的工业网络

以太网数据需求系统（EDAS）应用在许多工业应用中。它们都基于开放式架构标准，这使它们能发展和配置到现有和将来工厂范围内的数据捕获系统中。EDAS 单元允许用户远程监视和控制很大范围内的传感器、元器件、机器，并通

过以太网进行处理。EDAS 单元具有广泛的应用，包括机器监测和控制，联网和独立数据记录，环境监测和控制，远程数据需求，安全和接入控制。

生产厂商生产无线收发机和相关设备，包括为业务提供商提供的扩展的 WLAN 系统和无线因特网解决方案。通过使用典型的组件，无线通信网络可以提供 11Mbit/s 的数据传输速率来连接 30km 范围内的基站。多种安全机制用来防止未经过授权的有线、无线接入。这些设备支持点对点和点对多点的桥接操作，还支持漫游和许多第三方设备。它们使用 FHSS 调制，而且为连接两个或多个基站间的以太网局域网提供无线桥接方案。

大多数工业无线通信网络目前由许多需要终端用户配置的分离设备组成。在众多的销售商中，ELpro Technologies 公司（http：//www. elprotech. com/）的产品属于现代可操作工业无线通信网络。这家企业提供的产品适合石油天然气企业、采矿、化学、电厂、造纸、食品和罐头、制造企业等。其产品线包括无线 I/O 设备、调制解调器、RS-232 和 RS-485、以太网调制解调器、现场总线、网关、PLC 接口和无线协议转换器等。其无线通信系统可以工作在许可和免许可的频段下，比如 900MHz FHSS、450MHz、220MHz 和 869MHz 固定频段。

使用无线元器件骨干网（WIB）可以构建企业范围的无线通信网络，如图 5-9 所示。WIB 包括无线连接盒，且都具有连接单独元器件信号和现场总线的功能。每个连接盒都可以与其他的连接盒交换元器件和控制（I&C）信号。系统包括无线模块和无线网关模块。这些模块可以进行无线点对点通信。无线连接是根据信号来进行配置的。任何连接盒的信号都可以传输给其他的连接盒，其传

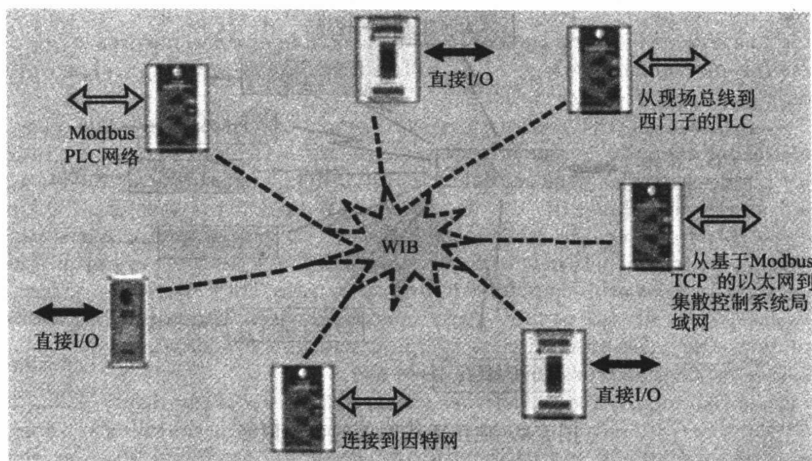



图 5-9 典型的工业无线系统（图片经过 ELPRO Technologies 公司的许可，http：//www. elprotech. com/）

输方式与互连总配线箱网络的方式相同。信号由现场总线、以太网或因特网产生。把连接盒用作中继器，可以扩大传输范围。信息可以在多个连接盒间进行路由，因此节点之间可以互通。

工业自动化网络是无线通信网络的另一个典型例子。这些系统在很大程度上还处于研究阶段。它们由许多自动化传感器的一系列进程组成，如图 5-10 所示。在系统中，无线传感器和元器件根据其位置和相关性来进行分组和联网。每组传感器和元器件与传感器总线相连，以与正在运行的独立进程进行通信。网络监测、控制每一个处理操作。还有许多其他企业的产品提供这种类型的工业网络。

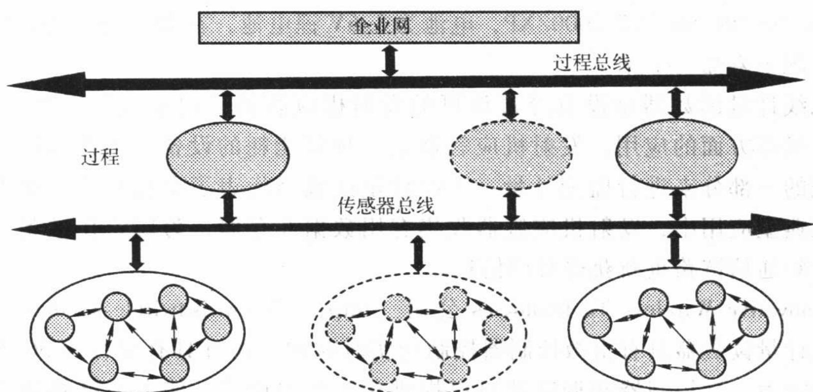



图 5-10　典型的工业自动化网络

Honeywell XYR 5000 无线通信系统产品系列包括监测静压、绝对压力、温度、超音速噪声的设备，以及检测蒸汽、天然气泄漏的设备（http://www.honeywell.com/）。系统的核心是 XYR 5000 传输机。这种无线传输机工作在 Modbus 模式下，并使用网络的主机原则。每个帧含有 11bit 字符：8bit 数据、偶校验位和 1bit 结束符。XYR 5000 可以与使用 RS-232 或 RS-485 接口的 4 ~ 20mA 设备进行通信。它采用 FHSS 方式，而且其传输距离取决于传输速度：速度为 76.8kbit/s 时，距离为 150m，19.2kbit/s 时；距离为 300m；4.8kbit/s 时，距离为 650m。整个系统的支持软件是无线管理工具包。

XYR 5000 产品线包括一个模拟输入接口，来提供连接 4 ~ 20mA 设备的无线能力。元器件把测量数据发送给基站，基站与控制系统或者数据需求设备（如记录器或者 PC）相连。每个基站最多接收 50 个传输机的信号。基站提供 Modbus 模式或者 4 ~ 20mA 模拟信号输出。Honeywell 大多提供基础现场总线产品，用来测量压力、温度、高度、流量、控制远程位置调理器和成套的控制系统。

Honeywell XYR 5000 系统由无线压力传输器等智能设备组成。压力传输器的工作频段是 902 ~ 928MHz 免许可的 ISM 频段，并使用 3.6V C 型锂电池供电，其

电池寿命为5年。

其他的销售商提供工业无线传感器和元器件。例如，Omega Engineering公司（http：//www. omega. com/）的OM-CP-RFTC4000A是一个小型的无线、低功耗、独立的基于温差的温度传输器。这种压缩便携设备用来测量、传输温度数据。当启用时，无线传输器把读数传输给主机，主机对数据进行实时分析。出于对数据安全的考虑，读数会被存入设备的存储器中。一个滑动开关用来控制传输机的关闭和开启，而且不会影响到设备的操作。PC使用OM-CP-RFC101A接收机可以接收数据，这个接收机直接连接到串行端口上。这个设备有以下特性：传输速率为4800bit/s，射频载波频率为418MHz，传输范围为36m，并支持Windows 95/98/ME/NT/2000/XP，电池为3.6V锂电池，在25℃每分钟都进行读数的情况下寿命为1年。

无线计量读数器是没有经过许可的发射机应答器，用来进行天然气、水、电子计量等方面的应用。发射机应答器是一种低能耗的设备，作为远程计量读数系统的一部分来进行监测计量。无线计量读数器代表了全自动的工业无线技术。在典型应用中，发射机应答器收集有用数据并存储，为应答作准备。然后通过射频通信链路重新获得有用信息。

Innovative Wireless Technologies公司（http：//www. iwtwireless. com/）生产的无线计量读数器具有由微控制器控制的实时时钟，而且具有保存前30天有用信息的能力。微控制器和调整器可以提供超级睡眠模式，使电池能够用16年。一些无线计量读数器的传输范围超过了2000m。

蜂窝网络是无线传感器、元器件组网的另一种方式，也可以应用无线计量读数器。例如，Meter-Master公司（http：//www. meter-master. com/ms/）有多种无线计量读数器，都可以通过GSM网络发送短消息。一种称为Cello的设备介于蜂窝手机和水下计量接口单元之间，可以工作在缺乏覆盖的区域，比如地下仓库或地下室。

Echelon公司（http：//www. echelon. com/）的LonWorks现场总线，把使用Modbus/TCP通用网关的现场总线和无线通信设备集成在一起。一个基于IEEE802.11b的无线网关，可以轮询Modbus的许多LonWorks元器件都有的从IP地址。以对象到对象为基础的、具有主/从功能的网关既可以充当服务器，又可以充当客户端。无线网关可以应用于建筑自动化、光监测、远程报警监测、后备电源设施、半导体器件、光控、电信、光工业操作等中。

Echelon公司还提供RRX04F无线交换机，并在LonWorks网络中使用。它具有8个输出信道，可以通过编程进行触发或瞬时操作，而且可以输出ON/OFF、PANIC、SCENE等。RRX04F接收机可以水平或垂直安装在平面或墙壁上。系统集成了码跳解码器来保证远程无鉴权进入的安全性。它使用一种有专利的码跳

系统来提供高安全性。系统有两个使用滚动码的信道。设备后面的集成印制电路板集成了一个神经元芯片和一个收发机。

### 5.4.2　无线内置检测和基于条件的维护

内置检测（BIT）可以看作是使用系统的一部分资源来进行的评估、诊断检测。BIT 可以应用在电路层、模块/汇聚层或者系统层。电路层的 BIT 使用模拟和数字方式。这些检测的特点是使用完善的协议和技术（IEEE1149）以及图形分析工具。模块层 BIT 由可编程元器件来支持。系统层 BIT 是独立的，并由复杂的硬件和软件支持。在系统层，BIT 可能需要来自许多信号的同步信息、参数，而且其门限值有很短暂的依赖性。

无线频率数据通信广泛应用在 BIT 中，而且其传感器嵌入在操作系统中，比如砂轮、旋转机械、工业系统，或者生物移植。传感器收集的信息通过内置射频传输机发送给附近的接收机。由于可以使用智能的和其他尖端的传感器、元器件软件、具有互操作性以及自测效用，BIT 的质量可以稳步提高。

适合 BIT 的无线通信设备的一个例子是由 Systran Federal Corp.（SFC）(http://www.systranfederal.com) 配置的。这个单元包括一个称为 PALM-IT 的轻便手持机，用作执行飞行诊断和维护处理。系统的核心包括一个具有 5 个功能的 PC 卡，支持下述接口：Mil-Std-1553、IEEE488、10Base-T 以太网和 Fortezza 加密的无线通信网络。前两个接口用作与航空电子设备连接，其他的用作与基于地面的设备通信。PALM-IT 被设计成对直线飞行操作的完整的软硬件解决方案，它提供传感器所需要的工具，用作开发可以上传和下载操作飞行程序（OFP）的客户应用程序，在电子设备上初始化 BIT，在飞行器和地面设备之间传送诊断信息，并执行其他维护操作。

另外一个例子是基于条件的维护（CBM），它是由很多组织维护的程序。CBM 对海军，空军，陆军，太空探索，国家航空和宇宙航行局，汽油和矿务探索，传输系统，铁路系统和其他工业类型都有特殊的重要作用，通过使用恰当的分析软件，可以评估和预测机械的健康指数，测出机械的差错率、使用寿命、所需的服务和维护等。CBM 有助于防止突然的机械报废，从而能够优化生产。

CBM 的一个版本用于网上监察系统，提供设备状况的当前信息。网上系统包括通过复用器连接的有线或无线传感器，复用器被联网到数据库计算机上。完整的网上监察系统依赖于运行规模，可能非常复杂昂贵。它可能需要大量的计划，很难存储。除了上行数据采集硬件、软件和测试成本，劳动力也是个持续性花费。

关键问题是设备需要监管的周期是多少？在良好的设计和管理程序下，由 CBM 采集数据非常划算。当机械设备是处理的关键，并曾失败过或操作超出初

始设计时，这种网上监察系统可以比数据采集器更加划算，这时频繁的状况监察可以改变维护方式和生产决议。

由于无线技术的发展和传感器的小型化和电路监管，无线 CBM 数据采集系统是可行的。由于机械健康监管会影响到产品的连续性，所以广泛的无线状况监测系统的执行是正当的。有了及时更新的机械状况，维护和生产就可以决定优化生产同时手工设备也可以更有效地操作。

在无线通信系统中不使用光缆对 CBM 来说是一种自然的进步，并且增强了灵活性。几个公司已经开发了无线 CBM 系统，比如 Wilcoxon 公司的 BlueLynx 和 Oceana Sensor 公司的 ICHM20/20。另外，Rockwell 公司有 HiDRA，并且 SKF 提升了它的无线通信系统。这些系统连接有线传感器到一个无线通信网络集线器，但是仍需要重要的电缆。

例如，Oceana Sensor 公司（http：//www. oceanasensor. com/）提供了一系列无线产品，它们可以用于基于设备状况的监测系统。公司提供不同的网络产品，比如 SHMINDUSTRAL 网络、ICHM 20/20 网络、SHM PDA 网络和建立在蓝牙上的无线技术及适合很多其他无线产业的应用。ICHM 20/20 通过内嵌的信号状况接口模块（SCIM）适应多种传感器类型。SCIM 上的数字信号处理器可以进行信号处理，提供从原始数据上优先抽取无线传输的特性。它利用 5V 直流电源供给设备并为内部备用的锂电池充电。电源可以用交流 110V 到直流 5V 转换器或直流到直流转换器来支持。这个公司为了不同的监测目的提供了多种传感器，比如加速计、温度传感器和声学传感器。

直插直用无线 CBM 系统使 ad hoc 网络可以连接合适的无线传感器节点，ad hoc 网络允许增加附加的传感器节点，直插直用收发机从无线传感器网络上接收信息，并将它连接到核心计算机。大部分公司的一些现存网络基于以太网，所以与其他的现场总线如 Modbus、DeviceNet 和 Fieldbus 相比，以太网具有灵活性。当 CBM 将无线通信网络集成到以太网时，数据可以在世界任意角落传输。这对那些产品和生产遍及全球的组织极其重要，一旦工厂信息被录入网络，监管局部操作的中央地区就可以参照这些工厂信息，这部分应用软件必须能被多用户使用。

## 5.5 无线人类健康监测和环境应用

无线传感器和仪器网络广泛用于监测人类健康。人类健康的应用包括人类生理数据的远程监测、跟踪和医院内的监测。典型的功能包括葡萄糖级别监测、器官监测和一般的健康监测。

无线传感器和设备也可以应用于环境状况监测和跟踪以及生物和原料的健

康监测。配置大型的密集传感器来监测多种实际现象并分别处理。无线传感器和工具网络广泛应用于环境监测，农业和林业，地震监测，空气质量和军事应用中。

### 5.5.1 无线人类健康系统

如今针对人类健康的无线传感器和仪器网络形式多样，从可移植无线医疗设备到远程健康监测系统，这些设备要求体形较小，对通信软硬件在协议执行、应用程序开发和安全问题上提出了挑战。

无线可移植生物医学传感器有潜力改革医学。已经为个别生物医疗应用开发了灵敏的传感器，包括葡萄糖监测、微观器官活力监测和视网膜修复。这些设备能够与外部通信系统或基站通过无线接口进行通信。而研究基于能源受限和计算能力受限的无线传感器的生物移植面临挑战，这些传感器必须是生物适合的、有容错能力的、能源有效和可扩展的。同时，在人体内嵌入传感器增加了额外需求，它们必须极度安全、可靠，在任何地理位置工作都不会失误，不能限制人的活动，只需要少量维护，这些需求使得特殊应用程序的解决方法与传统方法有极大区别。

目前在生物医学感应技术上开发了几种新型的传感器和新的应用。现代生物医学传感器有同样先进的微形制造设备和信号处理技术，并且更加便宜、精确和可靠。感应医疗增大了测量范围，典型的小型测量技术使得需要开发更为复杂的分析系统，包括“芯片上的生物化学实验室”传感器，这个在小型设备上的进步可能对生物医学的研究和医药的实现产生很大的影响。目前的电子生物学、光学和声学感应技术等已经作为有前途的生物医学传感技术在社会上出现。

移植无线传感器是现代生物医学传感器的一个典型的例子。其中一类传感器就是用作视觉修复的人工视网膜。在这个系统中构建了一个灵敏传感器和集成微系统工程（SSIM），将一个包括100个微型传感器的视网膜芯片移植到人眼中。这使得没有视觉或视觉受限的病人能看到可接受的程度。无线通信需要反馈控制，影像辨别和确认。这种传感器将生成的电信号转换成生物反映，模仿正常视网膜处理过程。这种设备是将照相机嵌在一副眼镜上进行无线通信。这个应用的挑战主要是传感器和收发器能源受限、计算能力受限、材料限制、使用寿命、鲁棒性、可扩性、安全性和调配需求问题。通信形式是确定性和周期性的，且TDMA对于能量节省很有意义（Schwiebert等，2002年）。

另一个移植无线传感器的例子是皮下感应系统，它可以实时提供病人躯体状况和病源位置信息。这类传感器的典型形式是由微处理器控制的，包括低速率的回转仪和一对二维加速器。体内安置的导航器相当于一个控制器。为特定

的病人运行软件，可以收集来自传感器的身体位置信息，使得它可以实行闭环控制策略。基于菜单的操作在一个有色触摸屏上显示，通信由无线 RS-232 协议产生。导航器通过一个设在皮肤表面的发射端供给能量并控制移植传感器，因而形成一个射频数据链路。

移动健康状况监测是无线传感器和设备的又一个应用，移动健康状况监测有利于紧急医疗处理和灾难反应，使得病人在监测中仍可移动。无线传感器用作监测病人的致命症状，比如心率和氧饱满度，将这些远程系统设计成以不显眼的方式测量生理因素，并为远程监测传输数据，这使得病人可以在监测过程中自由活动，这样的系统有利于监测服务中致命的标志（如对于在灾难环境下工作的火警）。无线传感器同样可以用于跟踪病人和救援人员。对于合适的传感器和工具、通用协议和将一系列设备和谐集成在一起的软件构架等的开发工作仍面临挑战。

瑞典（http：//www. thelocal. se/）的移动健康监测系统是无线健康系统的一个例子，TeliaSonera Sweden 协同 Hewlett Packard 和瑞典软件公司 Kiwok 开发了一个称为 BodyKom 的服务，BodyKom 通过无线连接到病人身上的一系列传感器的通信设备发挥功能，这个设备可以通过 TeliaSonera 全国内的移动网络与健康管理人士通信，持续监测病人健康状况。这个系统中，医院和医疗人员可以远程不断监测病人状况，而不需要接近他们。如果传感器监测到病人身体的异样或病人自己发现状况，系统就可以自动向医生或家属发送警报。BodyKom 目前用作监测病人脉搏，将来它可以向患有糖尿病、哮喘或其他需要紧急协助的病人提供服务。

Medtronic 有限公司（http：//www. medtronic. com/）有一个称为 CareLink 网络的系统，这个网络允许医生通过起搏器和其他移植设备取得数据来监测病人，这些设备用来感应肺液、心电图变化和其他生理数据，收集的信息通过电话线发送到只有医生可以接入的安全网页上。起搏器类似移植的心律转变除颤器（ICD），可以稳定不规则心跳。

移动心搏单元是无线健康监测系统的一个例子，CardioNet 公司（http：//www. cardionet. com/）已经开发了一个称为 CardioNet 的远程移动心搏器。CardioNet 系统包括一个小的三向 ECG 监视器（像脖子上带的垂饰或皮带夹）和一个像 PDA 的设备。ECG 监视器通过 900MHz 无线链路向 PDA 传送自己的数据，PDA 用来评估和存储信息，监测到的病人心率异常的信息可以通过蜂窝或城域网发送给中心站，然后医疗部门将采取进一步行动，利用这些信息可以用作诊断、预防和治疗。

Biotronik 公司（http：//www. biotronik. com/）正在生产的 ICD 携带一个无线远程数据发送器。ICD 可以通过 Biotronik Home Monitoring 系统向主治医师自

动发送诊断数据，数据是通过类似于手机的设备从 GSM 网络传送给服务中心，并进行分析，一旦遇到紧急情况，及时通知医师。系统应用 402 ~ 405MHz 带宽，穿过皮肤不会受到严重衰落。

人体生物遥测有助于那些在灾难地区工作的人，带有时间频率收发器的工具可以监测到潜在危险，从而采取预防或紧急行动。人体生物遥测用在载人航天器上，从而可以监测宇航员状况，在人类第一次到达月球时，宇航员的声音夹杂着 900 种其他信号，其中一些是宇航员的生理参数。

人类生物遥测的一个例子是基于生物传感器和工具的远程护理。这些系统中，传感器和工具监测病人的生命迹象，生成的数据通过收发器传送给基站用作观察和记录，基站接收数据并分析和显示信息。

心脏起搏器依靠远程遥测提高了佩戴它的病人的生活质量。心脏病专家通过给起搏器发送一个特殊的信号来发起远程遥测，通常在病人的胸部放一个变换器，通过使用收发器，医师可以为植入的起搏器远程编写不同的代码或基本算法。起搏器产生的典型数据包括电压、电流、宽度、电荷和传输脉冲的能量；感应和跟踪的数量和心电图；电池的阻抗、电流和电压值；连接线的阻抗。所有的性能参数都可以读取或分析，使医师确认起搏器的程序。

针对老年人的无线家庭护理系统引起很多 R&D 的注意，预计到 2025 年全球超过 65 岁的人口将达到 761000000，超过 1990 年的 2 倍。2002 年，像 General Electric、Hewlett Packard、Honeywell 和 Intel（Dishman，2004 年）等公司组成了老年服务技术中心（CAST）（http：//www.agingtech.org/）（Ross，2004 年）。CAST 的成立是为了鼓励老年相关技术的协作，其想法是通过无线传感器网络减少老年人在家里的行动，利用信息帮助他们服从医生的叮嘱，使得家人和朋友可以远程照顾他们，并及早监测疾病迹象。

无线家庭护理系统的关键技术是一个称为 mote 的小型电池传感器。这些由加州大学伯克利分校和 Crossbow 技术公司开发的传感器可以自组织地形成无线通信网络，相互间并与计算机共享数据。计算机软件可以分析来自 mote 的信息，计算常规任务并在有预警产生时展开行动。

### 5.5.2　无线环境和生活环境监测系统

生活环境监测是无线传感器网络的一个重要应用，在这些应用中，低能源无线传感器网络用于不同主题的长期信息收集。R&D 在这个领域上集中处理类似于硬件和软件的网络行为、节点出错、无线传输能力、干扰、雨雾等不同环境因素下部件的防护、网络拓扑、自组织能力、功率要求和能源有效性。

加州大学伯克利分校的 Mica mote 研究工作开始于 2002 年，主要调查无线生活环境监测系统的可选特性。研究中，将 32 种微粒放在感兴趣的地区，微粒

聚集在感应片上，并将感应结果传给一个网关（CerfCube），网关负责通过本地传输网络从感应片向远程基站传送数据。基站每15min复制一遍数据到基于卫星的数据库，用于存储信息。传感器网络既可以通过本地接入，也可以通过卫星链路远程接入，来调理和监测网络部件。

在这个应用中，Mica mote是系统的核心，它使用运行速度在4MHz的Atmel ATmega 103微处理器。一个916MHz射频收发机提供40kbit/s的双向通信。系统在一对AA-size电池上运行。一个Mica气候板使用51脚扩展连接器连接在处理器片上，并包括气温和湿度传感器、一个光电导管、气压计和温差电堆。

PODS是远程生态微传感器网络，是夏威夷大学的科研项目，通过建立无线环境传感器网络来调查濒临灭绝的动植物。这个系统包括一个电脑、无线收发器、环境传感器和数字照相机。系统信息中继到因特网链路上。MAC层使用蓝牙和IEEE802.11b，数据以IP包的形式进行传输。能源有效性是确定的设计目标之一，开发了称为多路径按需求路由（MOR）的ad hoc路由协议。用户可以通过因特网接入到系统，观察每10min更新一次的气候数据和每小时收集的图像数据。

在这项研究中，调研了传感器放置策略，取样距离和通信半径被确认为主要因素。拓扑结构包括三角形、正方形、六边形、星形和瓦状形。传感器放置测量基于3个目标：单一节点断路的恢复能力、至少要安置一个传感器的地区大小和最小节点数。

野生动植物遥测技术是惟一可行的可以跟踪和监测野生动植物的实验技术，对于要求这些动植物处于正常的生理和心理状态下，且不能影响其正常活动，这项应用尤为重要。实际上小到可以吞咽的无线发射机扩展了这项研究的可能性，同时，因为没有电源，传感器可能严重影响动物的正常活动，所以将传感器连接到动物身体上对长期研究尤为重要。

移植发射机已经被广泛应用在对野生动物习性和行为的研究中。在这类应用中，电池的使用时间和记录转换器的稳定性是项目成功的关键。为了研究冷血动物的蠕动，将一个简单的用来测量压力和稳定度的发送机移植到一个老鼠上，然后被蛇吞到肚子里，接着研究者记录温度和压力数据，直到发射机停止工作。

当使用遥感技术研究野生动物时，发射机的发射范围是另一个重要的因素。当跟踪野生动物时，发射距离可以从实验室实验的几厘米到几千米。另一个重要因素是要选择正确的转换器，它必须能够精确感应到要求的生理变化，同时，要防止体液的腐蚀。第三个重要的因素是发射机所要承受的温度范围。发射机的电池寿命也受它的工作温度的影响。

DolphinEAR 500（DE500）是用于野生动植物监测的软硬件设备的一个例

子，这个设备由 DolphinEAR 公司（http://www.dolphinear.com/）提供。DE500 是水听器、前置放大器和移动电话接口的集成。将它插到任意手机的附件连接器上，使得用户可以拨打并听到世界上任意手机上的水听器。这个声学流可以直接连接到电脑上并存储在硬盘上或记录在传统牒片或磁带上。任意标准数字手机（GSM 或 CDMA），甚至模拟电话机都可以使用，它不需要特殊的数字连接，用户只需拨打水听器的电话号码来启动监测。每个设备都有软件支持生成光谱图，允许用户显示实时的水下声音。

NanoTag 系列微处理器编码标签是传感器用于跟踪野生动物和牲畜的一个例子。Lotek Wireless 公司（http://www.lotek.com/）提供多种产品用于动物环境监测，主要适用于无线、声学、档案以及地面、淡水、海洋和鸟类栖息地等应用的卫星监测。NanoTag 带来了 3 个明显的技术：无线、数字处理和 2.8$mm^2$ ASIC 上的红外系统。无线发射器和基于专有编码机制的数字编码系统一起使用，编码的远程遥测系统使得最多 212 个发射器可以用在同一个频率上，同时保持对单个发射器的操作能力。编码的传感器发射器包括温度、压力和移动性感应，这些传感器既可以单独应用，也可以一起应用在无线、声学和联合声学无线的发射器平台上。

### 5.5.3　环境观察和预测系统

环境观察和预测系统（EOFS）是覆盖大范围地区的分布式系统。这些系统监测、模拟和预测物理过程，包括环境污染、气候、火山活动、洪水、潮汐、地震、海啸等。EOFS 包括 3 个主要部件：传感器站、分布式网络和集中处理站。集中处理站通常是综合计算位置，因为在很多应用中，从传感器收集的数据容量非常大。有很多可选的 EOFS 例子，从小范围系统到全球观察系统，例如全球地理观测系统（GEOSS）和地球环境预测系统（MFSTEP）。

MKⅢ是一个小型无线室外环境站的典型例子，出自美国环境公司（http://www.americanweather.com/）。MKⅢ是基于太阳能的，使用 315MHz 频率，传输范围可达 140m。感应装备包括降水量传感器、温度传感器、风速和方向传感器及湿度传感器，将各个传感器集合的数据传输到一个或更多的包括计算软件的接收机上进行分析和显示。

实时自动化本地估算（ALERT）系统也是环境观察和预测系统的典型例子，它建立于 20 世纪 70 年代，可能是最为人知的无线传感器网络。ALERT 传感器站点装有气象/水文传感器，可以收集降水、气温和风向等级信息，数据通过无线链路传给不同的基站。目前 ALERT 用在了美国西部大部分地区，主要用于洪水预警。

CORIE 是哥伦比亚河的 EOFS 的原型。在这个系统中，沿河安置了 13 个传

感器节点。传感器站固定在码头或浮标上。一个基站飘在水面上，用太阳能供电。传感器数据通过无线链路传送给岸上基站。

定位操作环境卫星 R 系列（GOES-R）计划是一个典型的环境观察和预测系统，2012 年预计将在下一系列带有初始引擎的卫星上结合新的工具。GOES-R 将要执行一系列任务，包括暴风和洪水预警，热带飓风预警，水文预测，水资源管理，海面和内部结构预测，太阳系和太空环境预测，国内和军事航空预测，冰状况预测，季节和周期气候预测，环境空气质量监控和能源反应，火灾和火山爆发监测和分析，以及长期全球环境变化评估。

## 5.6 射频识别

若不讨论射频识别，本书将会不够完整，目前无线传感器和工具网络的应用越来越重要，射频识别（RFID）是利用无线波来辨别人类和物体的一系列技术。RFID 的基本构架是一个小的微芯片附加一根天线，称为 RFID 异频雷达收发机或 RFID 标签。天线使芯片向电子接收机或读卡机传送确认信息，接收机将无线波转换成数字信息进行处理，并变换成其他有用形式。基于使用的微处理器的种类的不同，RFID 标签有潜力包括更多的信息，而不局限于人或物体的识别号。

20 世纪 70 年代出现了 RFID 系统，完整的 RFID 系统包括 RFID 标签（被动的、主动的、半被动的）、一根天线或可以从标签读写数据的终端、一个标签读卡器、标签编译站和排序设备。通常将天线和读卡器集成在一个产品上。先进的大型集成芯片是主要部件。RFID 根据其射频分为低频标签（125 ~ 134kHz）、高频标签（13.56MHz）、超高频标签（868 ~ 956MHz）和微波标签（2.45 ~ 5.8GHz）。

主动 RFID 标签使用内置电源持续给标签和它的通信回路供电。因为读卡器不用给标签供电，所以可以接收极低的射频信号。主动 RFID 标签持续供电，通常在接收距离较远时使用。

被动 RFID 依靠从读卡器传输的射频能量给标签供电。它们将来自读卡器的能量反射回去，用于接收并且暂时存储少量能量来生成反应。被动 RFID 要求从读卡器发射强射频信号，同时由于能量限制，从标签返回的射频信号强度要限制在很小级别。当标签和询问者之间很近时，他们能被很好利用。

半被动 RFID 使用内部电源监测环境状况，但需要像被动标签一样要读卡器传输的发射能量来反应供电。与被动标签不同的是，它使用内部电源来完成其他功能供电，比如监测环境状况（如温度、振动等），从而扩展了处理能力。

RFID 在得以全面应用之前还有很多问题需要解决。一个就是标签的读取。

被动和半被动标签在很大程度上基于与读卡器通信的反射调制技术。反射信号比传输信号弱，因此从读卡器传输的强信号会产生一个盲点，降低了灵敏度，因此使得很难识别标签信号。研究者已经提出了很多解决方案，比如，应用多信道接收器备份，并使用合适的滤波器。

另一个问题是存储在标签上的信息的安全性。因为标签上的信息很容易被读卡器获得，所以 RFID 系统可能会侵害消费者的隐私。虽然 RFID 标签可以加密，但很可能为追求特殊信息被跟踪，即使不理解具体内容。研究者注重安全性和隐私保护，防止使用通用解码技术得到标签信息。安全性可以通过很多方法解决，可以使用安全门来确定标签的安全状态或令标签包括可以被读卡器破译的安全码。

标准 RFID 产品是一个持续发展的过程，没有全局的公共组织管理 RFID 使用的频率。大体上，每个国家设定自己的规定，但主要的管理 RFID 频率分配的部门有美国的 FCC，加拿大的通信局，欧洲的欧洲电信标准所（ETSI），日本的公共管理部门、国内事务局、邮电所，中国的信息产业部。一个称为 EPCglobal（http：//www. epcglobalinc. org/）的组织正致力于使用 RFID 的国际标准以及任意国家和地区的公司提供的电子产品标识码（EPC）。

美国国防部（DoD）认识到 RFID 的潜在用途和它在安全事务上的应用，已经发布了 RFID 规格。2003 年 2 月，国防部联合产业部同主要的产业部门及专家召开政策会议，筹划 RFID 政策。第一次会议之后，于 2003 年 12 月和 2004 年 4 月分别举行了 RFID 高级会议，介绍了一项未解决的国防部政策中的重要概念，这项政策将从 2005 年 1 月开始生效。目前国防部标签的频率使用范围是 860～960MHz，最小的读取距离是 3m。可接受的标签类别有：类型 0，64bit 只读；类型 1，64bit 可读可写；类型 0，96bit 只读；类型 1，96bit 可读可写。

RFID 的应用范围很广，低频 RFID 标签主要用于野生动物和家畜识别和跟踪及汽车的防盗系统。高频 RFID 标签用于图书和书店、建筑的访问控制、航空的行李跟踪和识别徽章等。超高频 RFID 标签在商业上用于集装箱跟踪、交通工具和卡车跟踪。微波标签越来越受欢迎，用于远距离识别和跟踪。

在欧美国家，由于零售和政府组织的积极参与，RFID 被接受用于供货链中。2004 年沃尔马宣称到 2005 年 1 月，前 100 名供应商的集装箱都将带有 RFID 标签。这个用在服务界的技术引起了很多技术制造商、学院实验室和大企业的研究兴趣，Hewlett-Packard 和 SAP 公司正引进新的产品和服务来加快 RFID 标准化进程，带有标记的箱子正运往实际交易中。

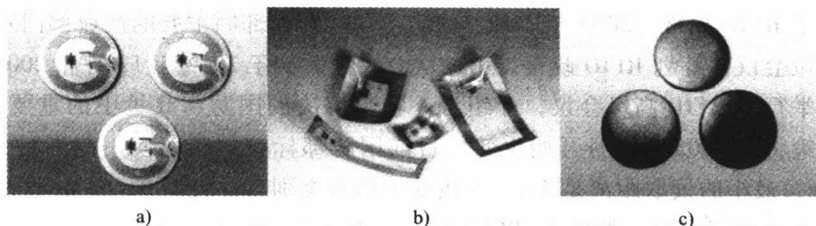
RFID 在供应界的引进被认为是对条形码的代替，它不需要直视或其他方式定位来读取标记，从而减少了人工部件。RFID 同样也有一个内存部件，它用来存储产品特征和制造信息，这些信息可以在标记制作时加载。因此，RFID 代表

全球供应和各公司做生意的改革进程。

在工业上，RFID 应用在资产维护的生产线上，它用作跟踪原材料生产，部件获取，手工制造、装配，进货，传送，使用，维护，维修和处理或复用。很多重金投资企业资产管理（EAM）并希望回报的大公司正将 RFID 和移动软件配合，用传送到标记的重要数据更新工作程序，这些信息回送到 EAM 使得记录更有意义，维护更加有效，可靠性预测更为有效。

图 5-11 描述了一个典型的 RFID 标签，Texas Instruments 公司（http：//www. ti. com/）生产的 RF-HDT-DVBB-N0 号产品是一个 13. 56MHz 封装式收发机。这种封装式收发机用于气温在 -25 ~ 220℃ 的复杂环境下，符合 ISO/IEC 15693 标准，这个国际标准使得不同制造商产品可以交叉处理。

图 5-11 描述了一系列典型的 RFID 收发器和标签，都符合 ISO/IEC 15693 标准。图 5-11a 的矩形发射机应答器和图 5-11b 的圆形发射机应答器收发器被称为镶嵌体，工作在 13. 36MHz，适合不同的噪声环境，它们含有由 64 块组成的 2kbit 用户内存，用于不同的应用，包括产品鉴定、售票、图书馆应用、供应链管理、CD/DVD 标记等。因为小巧轻便，所以它们可以很容易地转换成纸质或塑料标签。图 5-11c 的 RFID 发射机应答器收发器包括一个 24mm 圆形镶嵌体并放在一个 PVC 内，用于气温在 25 ~ 220℃ 的复杂环境。



a) b) c)

图 5-11 一个 RFID 标签

a）圆形镶嵌体 b）小型镶嵌体 c）圆形发射机应答器

RFID 产品的另一个应用是由 Applied Digital 公司（http：//www. adsx. com/）生产的 VeriChip。它是一个小型的、大小为 12mm × 2. 1mm 的可移植设备。芯片包含一个惟一的标识号，可以通过一个简单的扫描仪获取。从扫描仪经过的少量能源为收发器供能，然后发出传送标识号的射频信号。公司推出的这个产品用于防护、国土安全和其他安全接入等不同的应用。适用的潜在领域包括政府部门和私有建筑的授权进入控制，包括核能驻地、国家研究实验室、校正设施、敏感传输资源等。公司最近推出了 VeriPass 和 VeriTag，可以使得航空和港口安全人事部在安检时和在飞机上将他的行李接入 VeriChip。使用 VeriChip 的概念同样可以扩展到一系列消费产品上，比如 PC、膝上型电脑、汽车、手机和家庭。

根据 Alien Fechnology 公司（http：//www. alientechnology. com/）的说法，

ALB-2484是RFID标签的另一个例子。这家公司制造在超高频和微波频段上的标签。ALB-2484是一种大范围、低能耗、反向散射的标签，可以与诸如温度传感器、系统报警器、拥塞传感器等的外部传感器连接。因为这种标签没有活动的传送器，所以它可以说是安静工作的，同时它不要求FCC认证。此外，它还拥有模拟和数字I/O，外部温度和湿度传感器，扩展存储单元，防错探测器以及堵塞和振动传感器。厂家提供了许多软件，比如大范围识别、移动资产跟踪、安全接入系统、供给自动控制、低温管理、分级的被动式数据存储跟踪等。标签的读者可以在本地或通过在LAN上的远程服务器阅读数据。输入控制电路只有在设备准备好时才能打开射频，从而可以缓解与其他射频的冲突。输出控制电路在一个合法标签询问时起到门的作用。LAN接口使用TCP/IP或Alien动态同化协议。它使用两个分开的天线来进行收发，并在电源、射频、传送、接收、嗅探和追踪有可视化指示。

## 5.7 用户产品和其他应用

消费市场在无线产品以及网络的发展和部署中扮演着相当重要的作用。例如，蜂窝电话对现代通信系统以及移动网络技术的发展起了主要的推动作用，蓝牙首先在消费市场上被瞄准并产生了许多产业和其他应用。在这部分，对应用于消费产品的无线传感器和设备网络进行了讨论并给出了一些例子。还举出了一些其他使用在非常规地区的无线传感器和设备的例子。

### 5.7.1 无线用户产品

无线用户产品包括手提和随身可携带的电脑、无线信用卡阅读器和接收打印机；家庭娱乐系统和电子游戏；家庭自动化系统；自启动无钥匙门禁系统；无线安全系统；运动、业余爱好以及娱乐装置；RFID标签和接入控制徽章；健康护理和医学无线通信设备。一些无线消费产品将会在下面进行讨论。

无线耳机就是一种典型的无线产品，有许多的制造厂商。如MDRRF960RK是由Sony公司（http：//www.sonystyle.com/）生产的一款900MHz的耳机。全套包括一个发射器、耳机、连接卡、接入适应器、交流电源。发射距离为50m，适合在家中和户外的任何地方使用。

无线计算机产品是另一种消费设备。产品范围包括键盘、显示设备、鼠标、打印机、游戏设备和遥控器。如由D-Link公司（http：//www.dlink.com/）生产的DSM-320无线多媒体播放器，可以用来播放音乐、看视频或照片。这个装置通过IEEE802.11g协议或局域网从PC上无线下载数据。它支持所有的数字媒体格式以及遥控电视。

无线体育运动监视器在消费市场有广阔的应用前景。

图5-12中的HR233是由Oregon Scientific公司(http：//www2. oregonscientific. com/)生产的一种心脏速率监视器。此外，该公司还提供了许多其他无线通信设备。HR318不间断地监视心脏的速率，并通过在胸部的发射器发送信息到对应的无线腕表上。它可以记录30~240次的每分钟心跳并自动设置高低速率。它也能显示出消耗的卡路里以及燃烧掉的脂肪比例。



图5-12　一种无线心脏速率监视器
（取自Oregon Scientific公司
http：//www2. oregonscientific. com
/catalog/3_9_492. asp ）

家庭和办公室的应用为厂家和设备市场提供了巨大的商业机会。许多公司，不管大小，都提供无线家庭安全系统。一个典型的例子是Motorala家庭监视和控制系统(http：//broadband. motorala. com/consumers/home_monitoring. asp)，可以由使用者成套安装。系统包括了一个基站/网关、摄像机、门窗感应器、温度传感器和水感应器。它可以同时使用6台摄像机和高达8个传感器来监视接入点、极端的房间温度等。系统可以远程设置，并不间断地发送图像和文字到手机或E-mail上。为了使用手机或E-mail需要一台PC、数字用户线（DSL）或宽带设备。

Shell HomeGenie（http：//www. shell. com/）是另一种无线家庭安全系统。这个系统可以在监视之外用于控制。它可以同时操纵32个电源开关，4个无线和3个有线的摄像头，以及2个温度调理装置。公司又开发出附加的设备使得系统可以同时操纵256个设备。无线摄像头可以在20m距离内提供很好画质的图像。传输距离依赖于障碍物数目，比如金属板、厚墙和其他在2.4G工作的无线通信设备。厂商建议可能需要改变无线探头和天线位置，以使传输和接收均达到最佳。系统工作在PC（Pentium Ⅱ，Windows 98，128 MB RAM，Internet Explorer5.5）或Mac（Power Mac G3，OS X 10.2，128 MB RAM，Safari 1.0）平台下。

## 5.7.2　其他无线应用

无线传感器和设备系统在各种应用上逐渐地替代了有线系统，另外，每天都有一些新的应用被提出，这些应用是有线没有或者不可能实现的。这一节将会对前面几节提到的比较普遍的应用范例作进一步的解释。

结构健康监测（SHM）用来检测损伤和估算建筑物的残存寿命。SHM用于大的建筑物或设施，比如说楼房、桥梁、飞机、船只、宇宙飞船等。由周期性维护变为基于状况的维护，因此在需要更好的设计和部件维修以及更换时进行

估计检测。现今，基于 SHM 的无线传感器网络由于低的配置和维护费用、高的专业覆盖、分布式监控、高的准确度等优势被广泛使用。

当使用 SHM 时，不利的结构变化被监视到并传出，以减少循环消耗、提高可靠性并执行维护程序。多数系统使用较经济的传感器和元件，如 MEMS 传感器，无线传送器，压点激励器和传感器，微处理器，数据记录器和函数发生器。当使用某些 SHM 时，传感器被嵌入到结构中，要么是永远地连入到一台不间断监视器，以监视结构破坏、裂缝、变形、分层，要么是与外部结构相连。结构上的传感器网络提供一些关键信息，如结构状态、损毁率和服务环境。感应数据中的诊断信息被用来判断结构的健康状况，利用已知的决策进程来检查和修复。

举个例子，Lynch 等在 2004 年设计了一种低成本无线传感器，它用作一种无线 SHM 系统的组成部分。Lynch 等在他们的研究中解决了许多无线 SHM 系统的问题。由于便携式电源供应的有限使用时间，故对无线传感器的能量效率的优化非常必要。这与远距离无线通信需要大功率的能量来保持通信产生了矛盾。结果要使用有限的系统资源来传送原始时间历史记录。作者同样建议在无线传感器元件中设计和使用一种计算核心来适应本地数据处理。计算核心的作用是在收集原始时间历史数据时执行询问任务并传输分析结果，而不仅仅只是时间历史数据。为了表示计算芯片在执行这种嵌入式分析方面的能力，使用了一种双重时间序列破坏检测算法。在一个大集成的实验室结构中使用本地嵌入式破坏检测方法表明，在避免使用无线信道传输原始时间历史数据后节省了能量。

在另一个例子中，Smart Energy 的目标是在社会范围内提高能源效率。能量供应包括 3 个部分：产生、分配、消费。许多集成公司尝试能源供应由集成监视、信息处理、控制和实际设备组成。某些过程是无线完成的。

在智能能源应用中，无线传感器和设备网络的目标是在 3 个环节提高管理和使用水平。现在，很多组织正在组建安装无线通信系统，以保证与户外设备的快速联系。这些组织可以提供一站式的能源审计，并立即将能量消费分析提供给他们的用户。

在白皮书中，加州大学伯克利分校的社会利益信息技术研究中心（CITRIS）的讨论了他们的智能能源计划 Rabaey 等，2005 年）。计划的目标是建立一个社会范围的智能能源网络。他们估计使用微小和廉价的无线电子探头可以每年为加州在电力消费上节省七百到八百万美元。为了说明 CITRIS 的方法，伯克利的研究人员开发了一个无线传感器节点阵列以及操作它们的近似软件。他们将一个火柴盒大小的“智能尘土微粒”安装到电子和计算机科学学院的在建建筑中。

另一个例子，智能幼儿园（Chen 等，2002 年）则是一个无线传感器和设备的有趣的应用。一个基于传感器的无线通信网络为早期儿童教育提供了一个解

决问题的环境。空中密布但不阻塞的传感器不间断地捕获学生、老师以及普通教室物品之间的互动。传感器将观察资料无线地传输到一个有线元件中，以用来分析和储存。两个至关紧要的元件是 Sylph 和 iBadge，Sylph 是一种中波元件；iBadge 是一种能带在学生和教师身上的轻型传感器装置。系统利用中波设备服务和数据库技术可以扩展为无线通信网络、增强型传感器玩具和其他的教室物品。研究人员正探索来自拥有多跳分布网络、不可靠感应、大范围或高密度、异常感应数据类型这些特点的深入设备网络所带来的挑战。

停车计费器开始成为一个普通的无线通信系统应用。举个例子，数字支付技术（http：//www.digitalpaytech.com/）与 Linux（http：//linuxdevices.com/）一起提供无线停车元件和网络。在它们的系统中，嵌入式计算机提供与停车实时计费处理的网络连接，包括在线和离线信用卡交易。地面线以太网或无线调制解调器的网络可连接性允许基站被远程管理。在计费器中嵌入了单片机（比如 Intrinsyc CerfBoard 250）。CerfBoard 250 基于 400MHz IntelPXA250 XScale 处理器，包括 32MB flash 和 64MB SDRAM；10/100Mbit/s 以太网接口、USB、RS-232 串口、45 条数据线；电池供电的实时时钟和记忆卡扩展口。除了处理网络和支付进程外，操作系统动态地查看传感器和监视器的活动和状态。振动传感器负责感应那些尝试移动或破坏支付器的活动。门禁传感器则在计费器被盗或破坏时发出警报。

通过互联网的车辆行驶是本书的最后一个例子。在一个研究中，一个正在实施的系统允许用户在互联网上驾车（Al-Rousan 等，2003 年）。这种系统允许一辆车通过 3 个主要功能进行控制：点火系统、速度和驾驶。驾驶员接收来自挂载到汽车上的摄像机的实时视频图像。其他关键信息诸如车速、光照和剩油量则在 Web 页面上显示出来。所有人员和负责无线发送和接收的服务器之间的控制和通信可以使汽车充分地自由运动。

值得一提的是，FCC 最近已经为用于汽车的 IEEE802.11a 型专用短距离通信（DSRC）网络分配了 5.9GHz 频段。可以预料到它开始会被用于通行费征收和衡量交通拥塞中。不过，有相当多的研究是将这个频段用于其他问题上，比如控制无人智能汽车、在行驶时进行人车互动（Siewiorek 等，2002 年）。

## 5.8 小结

在本章中，前面章节中所有提供的信息都已被应用。这表明无线传感器和元器件应用系统在研发和商业活动中已引起了极大关注。本章从消费产品到太空探索给出了很多无线通信系统的例子。

# 参考文献

[1] Akinaga, H., High-sensitive magnetic-field-sensing materials composed of metal/semiconductor hybrid nanostructures, International Conference on MEMS, NANO, and Smart Systems, pp. 134 - 139, 2003.

[2] Al-Rousan, M., Jalajel, F., Arain, F., and Auf A., Web-based wireless vehicle control system, 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, 1, pp. 388 - 391, 2003.

[3] American National Standards Institute, http://www.ansi.org.

[4] Asada, G., Dong, M., Lin, T., Newberg, F., Pottie, G., Marcy, H., and Kaiser, W., Wireless integrated network sensors: low-power systems on a chip. Proceedings of the 24th IEEE European Solid-State Circuits Conference, pp. 9 - 12, 1998.

[5] Basios, C., Kostarakis, P., and Pallis, E., Performance evaluation of different wireless network topologies using the IEEE 802.11 MAC protocol, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2, pp. 90 - 98, 2003.

[6] Beutel, J., Kasten, O., Mattern, F., Roemer, K., Siegemund, F., and Thiele, L., Proto-typing wireless sensor network applications with BTnodes, Proceedings 1st European Workshop on Sensor Networks, pp. 323 - 338, 2004.

[7] Bing, B., Wireless Local Area Networks: The New Wireless Revolution, New York, Wiley-Interscience, 2002.

[8] Bishop, R. H. (ed.), The Mechatronics Handbook, Boca Raton, FL, CRC Press, 2002.

[9] Boukerche, A., Performance evaluation of routing protocols for ad hoc wireless networks, Mobile Networks and Applications, 9, pp. 333 - 342, 2004.

[10] Brooks, T., Wireless technology for industrial sensor and control networks, SIcon/01, Sensors for Industry Conference, pp. 73 - 77, 2001.

[11] Buttazzo, G. C., Scalable applications for energy-aware processors, Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Software (EMSOFT 2002), 2491, pp. 153 - 165, 2003.

[12] Caldari, M., Conti, M., Crippa, P., Orcioni, S., Solazzi, M., and Turchetti, C., Dynamic power management in an AMBA-based battery-powered system, 9th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, 2, pp. 525 - 528, 2002.

[13] Chandrakasan, A., R. Min, et al, 2002, "Power Aware Wireless Microsensor Systems".

[14] Chen, A., Muntz, R. R., Yuen, S., Locher, I., Park, S. I., and Srivastava, M. B., A support infrastructure for the smart kindergarten, IEEE Pervasive Computing, 1(2), pp. 49 - 57, 2002.

[15] Chen, W. K., The Electrical Engineering Handbook, Burlington, MA, Elsevier, 2005.

[16] Cheng, X., Huang, X., and Du, D., Ad Hoc Wireless Networking, London, Kluwer

Academic, 2004.

[17] da Silva, J. S. , da Silva, J. J. , Wanzeller, M. G. , and da Rocha Neto, J. S. , Monitoring of temperature using smart sensors based on CAN architecture, "15th International Conference on Electronics, Communication and Computers, pp. 218 - 222, 2005.

[18] Dickert, F. L. , Lieberzeit, P. A. , Gazda-Miarecka, S. , Halikias, K. , and Bindeus, R. , Imprinting with chemical sensors: challenges in molecular recognition and universal application, Symposium G, Molecularly Imprinted Materials, pp. 71 - 77, 2003.

[19] di Natale, C. , D'Amico, A. , and Dario, P. , Sensors and Microsystems, Hackensack, NJ, World Scientific, 2002.

[20] Dishman, E. , Inventing wellness systems for aging in place, IEEE Computer, 37(5), pp. 34 - 41, 2004.

[21] Dorf, D. (ed. ), Engineering Handbook, 2nd ed. , Boca Raton, FL, CRC Press, 2004.

[22] Dowla, F. , Handbook of RF and Wireless Technologies, Boston, Newnes, 2004.

[23] Duarte, D. , Vijaykrishnan, N. , Irwin, M. J. , and Tsai, Y. -F. , Impact of technology scaling and packaging on dynamic voltage scaling techniques, Proceedings of the 15th Annual IEEE International ASIC/SOC Conference, pp. 244 - 248, 2002.

[24] Dunbar, M. , Plug-and-play sensor wireless networks, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, March, pp. 19 - 23, 2001.

[25] Dyer, S. A. (ed. ), Survey of Instrumentation and Measurement, New York, Wiley, 2001.

[26] Edoardo, B. , and Bridges, K. , The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species, Journal of High Performance Computing Applications, 16, pp. 315 - 324, 2002.

[27] Edoardo, B. , and Sasaki, G. , Wireless sensor placement for reliable and efficient data collection, Hawaii International Conference on System Sciences, 2003.

[28] Engin, M. , Demirel, A. , Engin, E. Z. , and Fedakar, M. , Recent developments and trends in biomedical sensors, Measurement, 37, pp. 173 - 188, 2005.

[29] Eren, H. , Electronic Portable Instruments: Design and Applications, Boca Raton, FL, CRC Press, 2004.

[30] Fang, Z. , Bensaou, B. , and Yuan, J. , Collision-free MAC scheduling algorithms for wireless ad hoc networks, IEEE Global Telecommunications Conference, 5, pp. 2770 - 2774, 2004.

[31] Fiedler, P. , Bradac, Z. , Bradac, F. , Prokop, M. , and Wagner. M. , Further evolution of fieldbuses, WSEAS Transactions on Computers, 2, pp. 477 - 480, 2003.

[32] Fraden, J. , Handbook of Modern Sensors: Physics, Design and Applications, 3rd ed. , New York, Springer, 2004.

[33] Frenzel, L. E. , Wireless industrial networks: untethered monitoring and control, Electronic Design, 52(21), pp. 46 - 48, 50, 52, 54, 56, 58, 2004.

[34] Gambini, F. , The portability of electronic apparatus requires DC/DC converters, Elettronica Oggi, 321, pp. 104 - 109, 2003.

[35] Gang, Q., What is the limit of energy saving by dynamic voltage scaling? IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design, pp. 560 - 3, 2001.

[36] Girson, A., Handheld devices, wireless communications, and smart sensors: what it all means for field service, Sensors, 19(1), pp. 16 - 20, 2002.

[37] Graham, I., Communications, London, Hodder Wayland, 2001.

[38] Gustafsson, R., Mohammed, A., and Claesson, I., A combined channel estimation algorithm for coherent detection in mobile communication systems, Wireless 2002, Fourteenth International Conference on Wireless Communication, pp. 295 - 299, 2002.

[39] Halgamuge, M. N., Guru, S. M., and Jennings, A., Energy efficient cluster formation in wireless sensor networks, 10th International Conference on Telecommunications, 2, pp. 1571 - 1576, 2003.

[40] Haus, C., and Albrecht, H., Neutral data access to fieldbuses in process industries, IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, pp. 369 - 372, 2004.

[41] Haykin, S., Communication Systems, New York, Wiley, 2001.

[42] Haykin, S., and Moher, M., Modern Wireless Communications, Upper Saddle River, NJ, Pearson Prentice Hall, 2005.

[43] Held, G., Data Over Wireless Networks: Bluetooth, WAP, and Wireless LANS, New York, McGraw-Hill, 2001.

[44] Hill, J., Szewcyk, R., Woo, A., Culler, D., Hollar, S., and Pister, K., System architecture directions for network sensors, Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS 2000), pp. 93 - 104, 2000.

[45] Holtzman, J. M., and Zorzi, M., Advances in Wireless Communications, New York, Kluwer Academic, 2002.

[46] Horak, R., Communications Systems and Networks, Foster City, CA, M&T Books, 2000.

[47] Illman, P. E., Communications, New York, McGraw-Hill, 2001.

[48] Ilyas, M., The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks, Boca Raton, FL, CRC Press, 2003.

[49] International Electrotechnical Commission, http://www.iec.org.

[50] International Organization for Standardization, http://www.iso.org.

[51] Jaewook, R., Yun, S., Kim, B., Park, J.-O., Design and fabrication of a large-deformed smart sensorized polymer actuator, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 908 - 912, 2004.

[52] Kachirski, O., and Guha, R., Intrusion detection using mobile agents in wireless ad hoc networks, Proceedings IEEE Workshop on Knowledge Media Networking, pp. 153 - 158, 2002.

[53] Katz, D., and Gentili, R., Dynamic power status management of digital signal processors, Elektronik Industrie, 33(11), pp. 40 - 42, 2002.

[54] Kawadia, V., Narayanaswamy, S., Rozovsky, R., Sreenivas, R. S., and Kumar, P. R., Protocols for media access control and power control in wireless networks, Proceedings of the 40th

IEEE Conference on Decision and Control, 2, pp. 1935 – 1940, 2001.

[55] Kobak, N. N., Litvin, A. S., and Slesarenko, S. S., The analysis of increase a noise stability by wireless information system, 14th International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology, pp. 263 – 264, 2004.

[56] Kraver, K. L., Gutthaus, M. R., Strong, T. D., Bird, P. L., Cha, G. S., Hold, W., and Brown, R. B., A mixed-signal sensor interface microinstrument, Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, pp. 14 – 17, 2000.

[57] Kumar, A., and Rahman, F., System for wireless health monitoring, Proceedings of the ISA/IEEE Sensors for Industry Conference, pp. 207 – 210, 2004.

[58] Kurose, J. F., and Ross, W., Computer Networking: A Top Down Approach Featuring the Internet, Boston, Addison Wesley, 2005.

[59] Kuruvila, J., Nayak, A., and Stojmenovic, I., Progress-based localized power and cost aware routing algorithms for ad hoc and sensor wireless networks, Third International Conference on Ad Hoc, Mobile and Wireless Networks, pp. 294 – 299, 2004.

[60] Lee, K., Sensor networking and interface standardization, IEEE-IMTC Conference Proceedings, pp. 147 – 152, 2001.

[61] Lee, P. J. (ed.), Engineering Superconductivity, New York, Wiley, 2001.

[62] Levanon, N., Implementing Orthogonal Binary Overlay on a Pulse Train Using Frequency Modulation, IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 41, pp. 372 – 382, 2005.

[63] Liptak, B. (ed.), Instrumentation Engineers Handbook, 4th ed., Boca Raton, FL, CRC Press, 2002.

[64] Lynch, J. P., Sundararajan, A., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., and Carryer, E., Embedding damage detection algorithms in a wireless sensing unit for operational power efficiency, Smart Materials and Structures, 13, pp. 800 – 810, 2004.

[65] Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., and Anderson, J., Wireless sensor networks for habitat monitoring, ACM International Workshop on Wireless Sensor Network and Applications, 2002.

[66] Mallick, M., Mobile and Wireless Design Essentials, Indianapolis, Wiley, 2003.

[67] Mani, B., et al, 2001 "Smart Kindergarten: Sensor-Based Wireless for Smart Developmental Problem-Solving Environments," Mobile Computing and Networking, pp. 132 – 138.

[68] Matsunaga, H., and Hirano, K, . Modulation/demodulation scheme for high speed modem using matrix and inverse-matrix, 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp. 169 – 172, 2004.

[69] McDermott-Wells, P., Bluetooth scatternet models, IEEE Potentials, 23(5), pp. 36 – 39, 2005.

[70] McDermott-Wells, P., What is Bluetooth, IEEE Potentials, 23(5), pp. 33 – 36, 2005,

[71] McLean, C., and Wolfe, D., Intelligent wireless condition-based maintenance, Sensors, June, 2002, http://www.sensorsmag.com/articles/0602/14/main.shtml.

[72] Molisch, A. F., Wideband Wireless Digital Communications, Upper Saddle River, NJ,

Prentice Hall, 2001.

[73] Morais, D., Fixed Broadband Wireless Communications: Principles and Practical Applications, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2004.

[74] Muller, N. J., LANs to WANs: The Complete Management Guide, Boston, Artech House, 2003.

[75] Muller-Fiedler, R., and Knoblauch, V., Reliability aspects of microsensors and micromechatronic actuators for automotive applications, Microelectronics Reliability, 43, pp. 1085 - 1097, 2003.

[76] Nakamoto, T., Sukegawa, K., and Sumitomo, E., Higher order sensing using QCM sensor array and pre-concentrator with variable temperature, IEEE Sensors Journal, 5, pp. 68 - 74, 2005.

[77] National Standards Services Networks, http://www.nssn.org.

[78] Nicoletti, S., Zampolli, S., Elmi, I., Dori, L., and Severi, M., Use of different sensing materials and deposition techniques for thin-film sensors to increase sensitivity and selectivity, IEEE Sensors Journal, 3, pp. 454 - 459, 2003.

[79] Noll, A. M., Principles of Modern Communications Technology, Boston, Artech House, 2001.

[80] Ohrtman, F., and Roeder, K., WiFi Handbook: Building 802.11b Wireless Networks, New York, McGraw-Hill, 2003.

[81] Okamoto, G. T., Smart Antenna Systems and Wireless LANs, New York, Kluwer Academic, 2002.

[82] Olexa, R., Implementing 802.11, 802.16 and 802.20 Wireless Networks: Planning, Trouble shooting and Operations, Boston, Newnes, 2004.

[83] Ozkul, T., Teaching fieldbus standards to computer engineering students, IEEE Transactions in Education, 48, pp. 11 - 15, 2005.

[84] Packebush, P., Selecting a multifunction data acquisition board for a computer-based measurement system, Proceedings of the 20th IEEE Instrumentation Technology Conference, pp. 935 - 939, 2003.

[85] Panko, R. R., Business Data Networks and Telecommunications, Upper Saddle River, NJ, Pearson/Prentice Hall, 2005.

[86] Pardoe, T., and Snyder, G. F., Network Security; Albany, NY, Thomson/Delmar, 2005.

[87] Pattan, B., Robust Modulation Methods and Smart Antennas in Wireless Communications, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2000.

[88] Petrioli, C., Basgni, S., and Chlamtac, I., Configuring BlueStar: multihop scatternet formation for Bluetooth networks, IEEE Transactions on Computers, 52, pp. 779 - 790, 2003.

[89] Pfleeger, C. P., and Pfleeger, S. L., Security in Computing, 3rd ed., Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2003.

[90] Poor, R., Wireless mesh networks, 2003, http://wwww.sensormag.com/article/0203/

38/main. shtml.

[91] Pozar, D. M. , Microwave and RF of Wireless Systems, New York, Wiley, 2001.

[92] Rabaey, J. , Arens, E. , Federspiel, C. , Gadgil, A. , Messerschmitt, D. , Nazaroff, W. , Pister, K. , Oren, S. , and Varaiya, P. , Smart energy distribution and consumption information technology as an enabling force, CITRIS White Paper, 2005, http://www. citris. berkeley. edu/ SmartEnergy.

[93] Raghavendra, C. S. , Sivalingam, K. M. , and Znati, T. , Wireless Sensor Networks, London, Kluwer Academic, 2004.

[94] Raja, P. C. , and Suganthi, K, VLSI approach to wireless security mechanisms, IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, pp. 429 - 433, 2005.

[95] Ramjee, R. , La Porta, T. , Salgarelli, L. , Thuel, S. , Varadhan K. , and Li, L. IP-based access network infrastructure for next-generation wireless data networks, IEEE Personal Communications, 7(4), pp. 34 - 41, 2000.

[96] Rappaport, T. S. , Wireless Communications: Principles and Practice, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002.

[97] Reynolds, J. , Going Wi-Fi: A Practical Guide to Planning and Building an 802. 11 Net, Gilroy, CA, CMP Books, 2003.

[98] Rong, P. , and Pedram, M. , Battery-aware power management based on Markovian decision processes, IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design, pp. 707-713, 2002.

[99] Ross, P. E. , Managing care through the air, IEEE Spectrum, December, pp. 14 - 19, 2004.

[100] Ryan, M. J. , and Frater, M. R. , Communications and Information Systems, Canberra, New South Wales, Australia, Argos Press, 2002.

[101] Santamaria, A. , and Lopez-Hernandez, F. , Wireless LAN Standards and Applications, Boston, Artech House, 2001.

[102] Schwiebert, L. , Gupta, S. K. S. , Auner, P. S. G. , Abrams, G. , Lezzi, R. , and McAllister, P. , Biomedical smart sensor for the visually impaired, IEEE Sensors, 1, pp. 693 - 698, 2002.

[103] Shafi, M. , Ogose, S. , and Hattori, T. , Wireless Communication in the 21st Century, New York, Wiley-Interscience, 2002.

[104] Siegemund, F. , and Krauer, T. , Integrating handhelds into environments of cooperating smart everyday objects, Proceedings 2nd European Symposium on Ambient Intelligence (EUSAI 2004), pp. 160 - 171, 2004.

[105] Siewiorek, D. , Smailagic, A. , and Hornyak, M. , Multimodal contextual car-driver interface, Proceedings Fourth IEEE International Conference on Multimodal Interfaces, pp. 367 - 373, 2002.

[106] Sinha, A. , Wang, A. , and Chandrakasan, A. , Energy scalable system design, IEEE Transactions on VLSI Systems, pp. 135 - 145, 2002.

[107] Sklar, B. , Digital Communications: Fundamentals and Applications, Englewood Cliffs,

NJ, Prentice Hall, 2001.

[108] Smith, D. R., Digital Transmission Systems, Boston, Kluwer, Academic, 2004.

[109] Smith, P., Mobile and Wireless Communications: Key Technologies and Future Applications, Stevenage, UK, Institution of Electrical Engineers, 2004.

[110] Snoonian, D., Smart buildings, IEEE Spectrum, August, pp. 18 - 23, 2003.

[111] Sriram S., Reddy, T. B., Manoj, B. S., and Murthy, C. S. R., The influence of QoS routing on the achievable capacity in TDMA-based ad hoc wireless networks, IEEE Global Telecommunications Conference, 5, pp. 2909 - 2913, 2004.

[112] Srivastava, M., Muntz, R., and Potkonjak, M., Smart kindergarten: sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments, Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, ACM Press, pp. 132 - 138, 2001.

[113] Stallings, W., *Data and Computer Communications*, 7th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2004.

[114] Sun, Y., Wireless Communication Circuits and Systems, London, Institution of Electrical Engineers, 2004.

[115] Sydenham, P. H., and Thorn, R. (eds.), Handbook of Measuring System Design, New York, Wiley, 2005.

[116] Takahashi, S., Hamamura, M., and Tachikawa, S. A., Demodulation complexity reduction method using M-algorithm for high compaction multi-carrier modulation systems, 1st International Symposium on Wireless Systems 2004, pp. 418 - 422, 2004.

[117] Tan, G., and Guttang, J., Locally coordinated scatternet scheduling algorithm, 27th IEEE Conference on Local Computer Networks, 2002.

[118] Tanenbaum, A. S., Computer Networks, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2003.

[119] Temple, R., and Regnault, J., *Internet and Wireless Security*, London, Institution of Electrical Engineers, 2002.

[120] Thomas, L., Kalinowski, J., Cook, C., and Verduzco, L., Fieldbus instruments support a larger vision: intelligence moves plant from preventive maintenance to predictive maintenance, Intech, 51(7), pp. 22 - 26, 2004.

[121] Tomasi, W., Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 2001.

[122] Tomsho, G., Tittel, E., and Johnson, D., Guide to Networking Essentials, 3rd ed., Thomson Learning, Toronto, Ontario, Canada, 2003.

[123] Vaidyanathan, R., Kant, L., McAuley, A., and Bereschinsky, M., Performance modeling and simulation of dynamic and rapid auto-configuration protocols for ad hoc wireless networks, Proceedings 36th Annual Simulation Symposium, pp. 57 - 64, 2003.

[124] Villarruel, J. G., Gómez, D. S., González Pérez, L. F., and García, A. G., RF *analysis applied to digital wireless receivers design*, 15th *International Conference on Electronics*,

Communication and Computers, pp. 36 - 41, 2005.

[125] Voglewede, P. E., and Hessel, C., Efficient error free data transmission in a line of sight bandlimited channel, MILCOM 2000, 21st Century Military Communications. Architectures and Technologies for Information Superiority, pp. 266 - 270, 2000.

[126] Wang, K., Chiasserini, C.-F., Proakis, J. G., and Rao, R. R., Distrbuted fair scheduling and power control in wireless ad hoc networks, IEEE Global Telecommunications Conference, 6, pp. 3556 - 3562, 2004.

[127] Wang, S. Q., MacDonald, P., Kruger, M., and Welch, M., Wafer level wireless temperatures sensing and its applications in RF plasma etch in VLSI processing, Asia Pacific Radio Science Conference Proceedings, pp. 490 - 493, 2004.

[128] Webster, J. G. (ed.), Electrical Measurement, Signal Processing, and Display, New York, Wiley, 2004.

[129] Webster, J. G. (ed.), Mechanical Variables Measurement: Solid, Fluid, and Thermal, New York, IEEE Press, 2000.

[130] Weisman, C. J., The Essential Guide to RF and Wireless, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002.

[131] Wismeijer, D., Customizing fieldbus function blocks, Control Engineering, 51, pp. IP1-4, 2004.

[132] World Standards Services Networks, http://www.wssn.net.

[133] Worms, P., Security reaches the end of the line, Network Computing, 13(7), pp. 10-11, 2004.

[134] Wu, H., Huang, C., Jia, X, and Bai, B., QoS routing of multiple parallel paths in TDMA/CDMA ad hoc wireless networks, Proceedings of SPIE, 5284, pp. 205-213, 2004.

[135] Xiaoning, Y., et al., Investigation of PCB layout parasitic in EMI filtering of I/O lines, IEEE EMC International Symposium, pp. 501-504, 2001.

[136] Xinxia, C., and Dafu, C., The development of biosensors and biochips in IECAS, Network and Parallel Computing, IFIP International Conference, pp. 522-525, 2004.

[137] Xu, N., A survey of sensor network applications, 2003, http://enl.usc.edu/ningxu/papers/survey.pdf.

[138] Ying, H., and Chong, K. P., Sensor scheduling for target tracking in sensor networks, 43rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 743-748, 2004.

[139] Yuan, L., and Gang, Q., Design space exploration for energy-effcient secure sensor network, Proceedings IEEE International Conference on Application-Specific Systems, Architectures, and Processors, pp. 88-97, 2002.

[140] Zaruba, G. V., Basagni, S., and Chlamtac, I., Blue Trees-scatternet formation to enable Bluetooth-based personal area networks, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 2001.

[141] Zhang, Y., and Chakrabarty, K., Energy-aware adaptive checkpointing in embedded real-time systems, Design, Automation and Testing in Europe Conference and Exhibition, pp. 918-

923, 2003.

[142] Ziemer, R., and Peterson, R., *Introduction to Digital Communications*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 2001.

[143] Ziemer, R. E., and Tranter, W. H., *Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise*, New York, Wiley, 2002.

国际视野　科技前沿

## 国际信息工程先进技术译丛

《WCDWA原理与开发设计》

《下一代移动系统：3G/B3G》

《IMS:IP多媒体概念和服务》（原书第2版）

《下一代无线系统与网络》

《深入浅出UMTS无线网络建模、规划与自动优化：理论与实践》

《HSDPA/HSUPA技术与系统设计——第三代移动通信系统宽带无线接入》

《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》

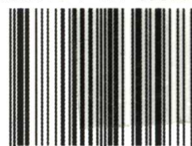
《印制电路板——设计、制造、装配与测试》



上架指导：工业技术/通信技术

CRC Press
Taylor & Francis Group

ISBN 978-7-111-23058-8



ISBN 978-7-111-23058-8

封面设计：马精明

编辑热线：(010)88379768

地址：北京市百万庄大街22号　邮政编码：100037
联系电话：(010) 68326294　网址：http://www.cmpbook.com（机工门户网）
(010) 68993821　E-mail: cmp@cmpbook.com

定价：29.00元